

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В ОБСЕРВАТОРИИ МАУНТ-ВИЛСОН И РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ $F_{10.7}$ НА ФАЗЕ СПАДА И МИНИМУМА 24 ЦИКЛА

Ахтемов З.С., Цап Ю.Т., Малащук В.М.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, пос. Научный, Крым, Россия

SUNSPOT MAGNETIC FIELDS ACCORDING TO MEASUREMENTS WITH MOUNT WILSON OBSERVATORY AND RADIO EMISSION $F_{10.7}$ DURING DECLINING AND MINIMUM PHASES OF CYCLE 24

Akhtemov Z.S., Tsap Y.T., Malashuk V.M.

Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Crimea, Russia

A comparative analysis of the evolution of the maximum magnetic field strengths of sunspots obtained with the Mount Wilson Observatory and the spectral flux of radio emission at a frequency of 2.8 GHz ($F_{10.7}$) during the declining and minimum phases of the 24th cycle of solar activity (2015–2019) was carried out. An anomalous behavior of the magnetic field of sunspots with a strength > 1500 G was detected, which is in good agreement with the results of observations with the BST-2 telescope of CrAO RAS. Despite a slight increase in the average values of the magnetic field from 2015 to 2017, a scatter plot for $F_{10.7}$ and Wolf numbers did not show any peculiarities. This indicates the decisive contribution to the solar activity index $F_{10.7}$ of the thermal bremsstrahlung mechanism of radio emission. The influence of the cyclotron radio emission from active regions on the $F_{10.7}$ index behavior over long time scales is discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-13-16

Введение

В настоящее время одним из наиболее популярных индексов солнечной активности является индекс $F_{10.7}$ – спектральный поток радиоизлучения от всего диска Солнца на длине волны 10.7 см (рис. 1а). Он определяется тормозным и магнитотормозным (циклотронным) механизмами радиоизлучения в активных областях (АО). Однако до сих пор вопрос о вкладе теплового и циклотронного излучения в индекс $F_{10.7}$ остается открытым.

В АО нижней короны и переходной области, где величина индукции магнитного поля $B = 10^2$ – 10^4 Гс, микроволновое излучение солнечных активных областей с длиной волны 1–30 см может определяться циклотронным механизмом генерации на второй и третьей гармонике электронной гирочастоты $\omega_B = eB/(mc)$, где e и m – масса и заряд электрона соответственно и c – скорость света. Излучение возникает в неоднородном магнитном поле над солнечными пятнами в (рис. 1б) гирорезонансных слоях [1–2]. Ранее мы попытались оценить вклад циклотронной компоненты в индекс $F_{10.7}$, исходя из особенностей поведения магнитного поля пя-

тен B_{Cr} с напряженностью > 1500 Гс по измерениям на БСТ-2 КрАО в 24 цикле. Однако вопрос о возможных ошибках измерений остался открытым.

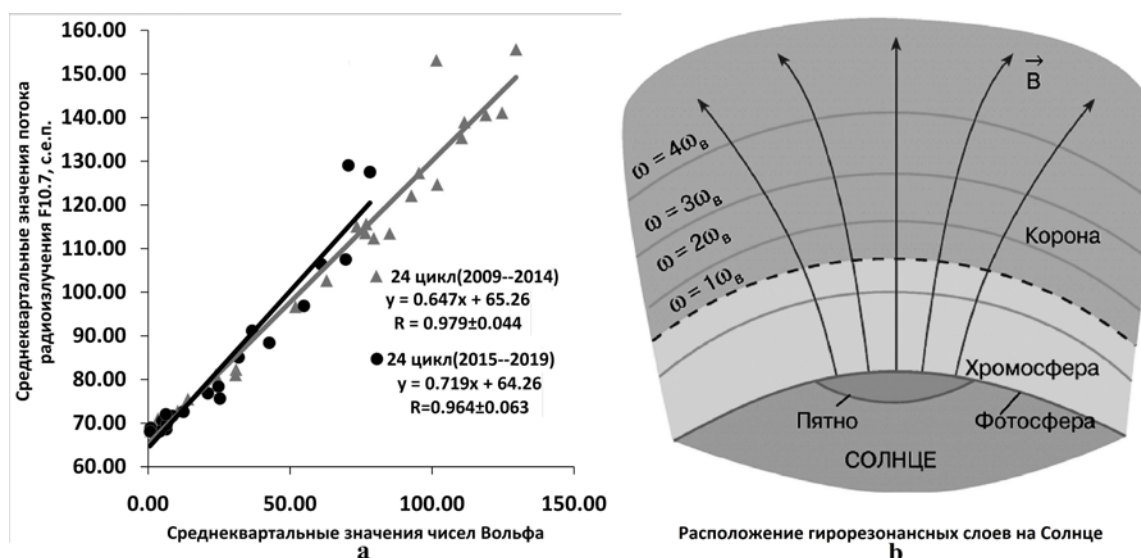


Рис. 1. а – Диаграмма рассеяния потока радиоизлучения $F_{10.7}$ и чисел Вольфа W на фазе минимума, роста и максимума 24 цикла (серый цвет), а также фазе спада и минимума (черный цвет). Коэффициенты корреляции R между $F_{10.7}$ и W на фазе роста (2009–2014) и фазе спада (2015–2019) соответственно равны 0.98 ± 0.04 и 0.96 ± 0.06 , б – Схематическое изображение гирорезонансных слоев АО (<http://www.astronet.ru/db/msg/1210270>).

Цель настоящей работы – провести сравнительный анализ эволюции для максимальных напряженностей магнитного поля пятен, полученных в Mount Wilson Observatory (MWO) с $B_{MWO} > 1500$ Гс, чисел Вольфа W и спектрального потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ на фазе спада и минимума 24 цикла солнечной активности (2014–2019 гг.). Сравнить полученные результаты с данными БСТ-2 и попытаться оценить вклад циклотронной компоненты в индекс $F_{10.7}$, исходя из данных обсерватории MWO.

Наблюдения и обработка данных

Для проведения исследований использовались максимальные значения магнитных полей пятен за период с 2014 по 2019 гг., находящиеся в свободном доступе на сайте <ftp://howard.astro.ucla.edu/pub/obs/drawings>, которые следуют из визуальных спектральных измерений расщепления зеемановских компонент линии FeI 630.2 нм с g-фактором 2.5.

Для чисел Вольфа, которые являются одним из основных количественных показателей солнечной активности, мы воспользовались данными, находящиеся в свободном доступе на сайте Королевской обсерватории Бельгии <http://www.sidc.oma.be>. Мы использовали также результаты ежедневных измерений, потока радиоизлучения $F_{10.7}$, опубликованные на сайте Национального департамента по окружающей среде США (National

Centers for Environmental Information) – <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solar-indices.html>.

Среднеквартальные и сглаженные графики изменения со временем напряженности магнитного поля пятен, строились по данным БСТ-2 КрАО РАН (рис. 2а) и MWO (рис. 2б). При этом для большей наглядности мы также привлекли значения индекса $F_{10.7}$. Как видно, на фазе спада 24-го цикла магнитные поля пятен, измеренные в MWO, также как и по данным в КрАО ведут себя аномальным образом (см. также рис. 3) – магнитное поле растет с 2015 по 2017 гг. Обращает также на себя внимание, что коэффициент корреляции R между B_{MWO} и числами Вольфа W оказался равным 0.19 ± 0.21 .

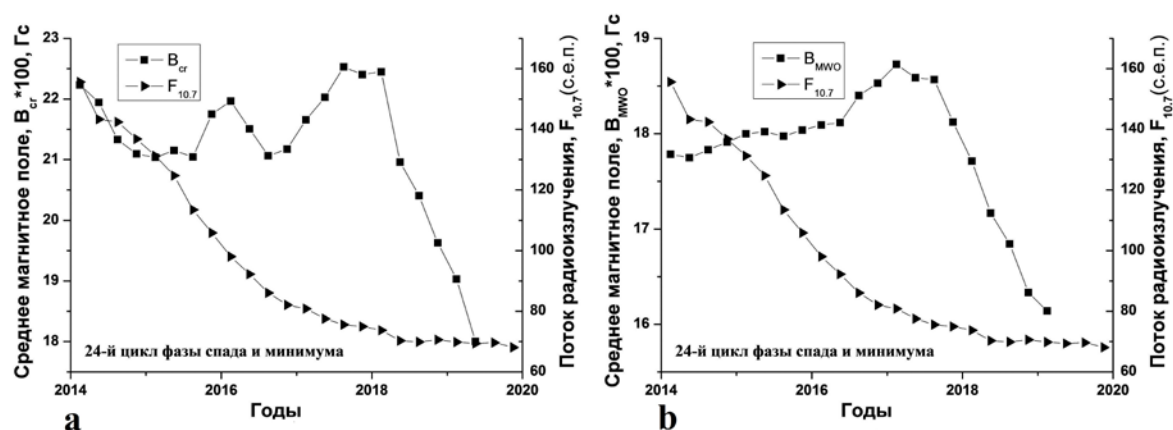


Рис. 2. Эволюция среднеквартальных усредненных значений напряженностей магнитного поля солнечных пятен B_{Cr} и B_{MWO} и значений потока радиоизлучения $F_{10.7}$ в период с 2014 по 2019 гг.

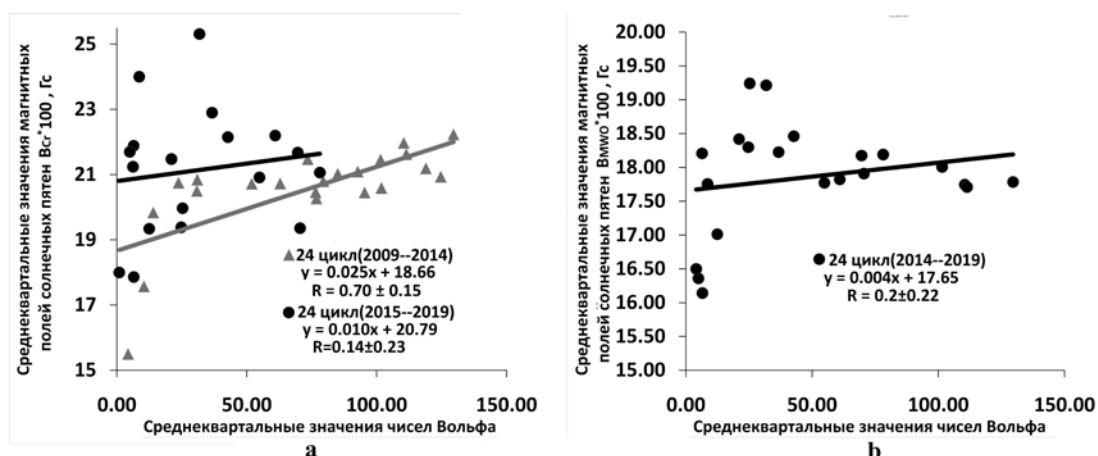


Рис. 3. а – Диаграммы рассеяния среднеквартальных значений B_{Cr} и W с 2009 по 2014 гг. (серый цвет) и с 2015 по 2019 гг. (черный цвет), б – Значения B_{MWO} и W (за период с 2014 по 2019 гг. $R = 0.20 \pm 0.22$). На фазе спада 24-го цикла, магнитные поля пятен ведут себя аномальным образом.

Можно предположить, что вклад циклотронной компоненты излучения в индекс $F_{10.7}$ должен возрастать с 2015 по 2017 гг. из-за аномального

поведения магнитного поля пятен. Это предполагает, что с учетом «нормального» уменьшения чисел Вольфа на фазе спада на диаграммах рассеяния для W и $F_{10.7}$ (рис. 1а) в заданный период времени должен наблюдаться заметный рост наклона регрессионной прямой. Поскольку это не наблюдается, то мы приходим к выводу о пренебрежимо малом вкладе циклотронной компоненты в индекс $F_{10.7}$.

Выводы

Кратко сформулируем основные результаты работы.

- Как следует из анализа эволюции усредненных значений напряженности магнитного поля солнечных пятен B_{MWO} и индекса $F_{10.7}$, а также диаграммы рассеяния между магнитным полем пятен и числами Вольфа за период с 2014 по 2019 гг., магнитные поля пятен ведут себя аномальным образом на фазе спада 24-го цикла, а их напряженности с 2015 по 2017 гг. даже незначительно возрастают.
- Коэффициенты корреляции на фазе спада и минимума 24 цикла (2014–2019) между B_{MWO} и индексом $F_{10.7}$, а также между B_{MWO} и числами Вольфа W соответственно равны 0.19 ± 0.21 и 0.20 ± 0.22 .
- Из аномального поведения напряженностей солнечных пятен на фазе спада 24 цикла, а также регрессионного анализа следует, что вклад циклотронной компоненты в интегральный индекс Солнца $F_{10.7}$ является незначительным, т.е. определяющую роль играет тепловой тормозной механизм излучения.

Литература

1. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. – М.: Наука, 1964.
2. Vourlidas A., T.S. Bastian and M.J. Aschwanden. // The Astrophysical Journal, 489:403–425, 1997 November 1