

ПРЕДВСПЫШЕЧНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА RSTN И NORH

Абрамов-Максимов В.Е.¹, Бакунина И.А.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Нижегород, Россия

PRE-FLARE FLUCTUATIONS IN SOLAR RADIO EMISSION FROM RSTN AND NORH OBSERVATIONS

Abramov-Maximov V.E.¹, Bakunina I.A.²

¹Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia

²HSE University, Nizhny Novgorod, Russia

We present a case of simultaneous recording of pre-flare quasi-periodic fluctuations (QPF) of radio emission from the Sun on the Nobeyama Radioheliograph (NoRH) and on the Radio Solar Telescope Network (RSTN) radio telescope. We used correlation plots obtained at NoRH at 17 GHz and observations of the total solar radio flux on several frequencies from 0.41 to 15.4 GHz at Learmonth Observatory in western Australia. In the data obtained on both instruments, a pre-flare wavetrain of fluctuations is observed before a flare of class X4.8 (according to GOES). QPFs at lower frequencies (400–600 MHz) begin later than those at high frequencies by 3–4 min. QPFs at frequencies of 1.4–15.4 GHz occur almost synchronously. The highest amplitude of QPFs is observed at a frequency of 4995 MHz. The observed QPFs can be explained by the force-free magnetic rope model (Solov'ev and Kirichek, 2023).

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-13-16>

Явление усиления квазипериодических флуктуаций (КПФ) радиоизлучения Солнца незадолго перед вспышкой известно уже несколько десятков лет [1–10]. Аналогичный эффект наблюдался также в мягком рентгеновском излучении [11–13] и даже в геомагнитном поле [14, 15].

Новые возможности для исследований предвспышечных КПФ появились, когда начал работать радиогелиограф Нобейма (NoRH) [16]. Архив данных наблюдений на NoRH хорошо подходит для такой задачи благодаря длинному ряду ежедневных (6–8 часов в день) наблюдений (с июня 1992 по март 2020 г.), хорошему временному (1 сек) и пространственному (10 сек. дуги на волне 1.76 см) разрешению. Большое количество случаев возрастания мощности КПФ перед вспышками с большим разнообразием квазипериодов от 3-х до 100 минут было обнаружено с использованием данных наблюдений на NoRH [17–24]. Что интересно, при всем разнообразии периодов и длительностей цугов, длительность цугов в периодах колебаний во всех случаях оказалась примерно одинаковой. Цуги не превышают 10 импульсов, составляя в среднем 4–6 импульсов. Анализ пространственного распределения КПФ показал, что в рассмотренных случаях наиболее сильно предвспышечные КПФ проявляются в тех частях актив-

ной области (АО), в которых наблюдается максимальная радиояркость во время вспышки [23]. Анализ частоты встречаемости предвспышечных КПФ, выполненный по корреляционным кривым, у 50–75% рассмотренных событий разной мощности выявил предвспышечные флуктуации микроволнового излучения. Предвспышечные КПФ выявлены в 75% мощных событий (M5 и мощнее) и в 50% более слабых событий (слабее M5) [24]. Поскольку корреляционная кривая – это усредненная характеристика, полученную оценку можно рассматривать как нижнюю границу количества событий с КПФ. По характеру КПФ можно разделить на две группы: гармонические и спорадические [24]. Возможно, в разных событиях КПФ имеют разную природу.

Недостатком NoRH, как и каждого наземного инструмента, является то, что наблюдения не могут вестись круглосуточно. Для решения этой проблемы имеет смысл привлечь данные наблюдений сети RSTN (Radio Solar Telescope Network) [25]. RSTN представляет собой сеть из четырех обсерваторий, равномерно расположенных по долготам, что позволяет вести непрерывный мониторинг полного потока солнечного радиоизлучения на 8-ми частотах: 245, 410, 610, 1415, 2695, 4995, 8800 и 15400 МГц. В данной работе мы ограничились анализом данных только одной из станций RSTN – Learmonth, расположенной на западе Австралии, потому что интервал наблюдений Learmonth (примерно с 23 до 10 UT) пересекается с интервалом наблюдений в Нобееме, что дает возможность сопоставить результаты, получаемые на двух инструментах.

Цель данной работы – исследование предвестников солнечных вспышек в радиодиапазоне по одновременным наблюдениям на NoRH и RSTN.

Для работы были использованы наблюдения Солнца, выполненные на NoRH на частоте 17 ГГц (1.76 см) в интенсивности (параметр Стокса I). В данной работе мы использовали так называемые корреляционные кривые (correlation plots). Корреляционные кривые отражают усредненные корреляции между антенными парами с исключением пар антенн с короткими базами. Корреляция возрастает при сильных сигналах, например, от вспышек. 1% корреляции (или 0.01 для кривых, нормированных на 1) соответствует 30 SFU (Solar Flux Unit, $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) плотности потока.

На рис. 1 показана корреляционная кривая, полученная на радиогелиографе Нобеема 23 июля 2002 г. Можно видеть предвспышечные КПФ, которые начинаются примерно в 00:21 UT.

На рис. 2 показаны записи полного потока радиоизлучения Солнца за тот же день по наблюдениям на станции Learmonth сети RSTN на семи частотах от 0.41 до 15.4 ГГц. На более высоких частотах (1.415, 2.695, 4.995, 8.800 и 15.40 ГГц) предвспышечные КПФ начинаются примерно в 00:22 UT, т.е. примерно в то же самое время, что и по наблюдениям на NoRH на частоте 17 ГГц. А на более низких частотах (0.41 и 0.61 ГГц) – примерно в 00:25 UT, т.е. на 3–4 минуты позднее.

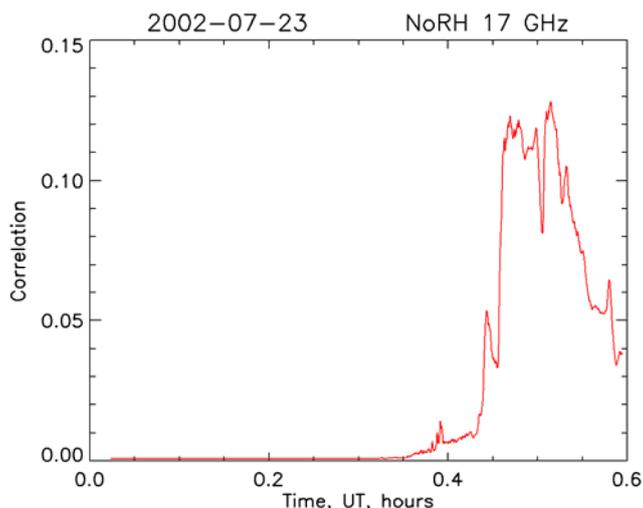


Рис. 1. Фрагмент корреляционной кривой по наблюдениям на NoRH 23 июля 2002 г. перед вспышкой класса X4.8. Ось абсцисс – время UT в часах, 0 соответствует моменту 00:00 UT 23 июля 2002 г. Ось ординат – корреляция, нормированная на 1 (0.01 соответствует 30 SFU (Solar Flux Unit, $10^{-22}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$)).

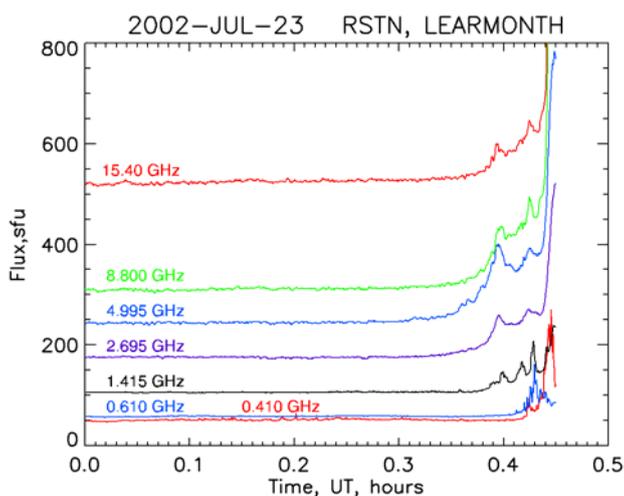


Рис. 2. Временные профили полного потока радиоизлучения Солнца на частотах 0.410, 0.610, 1.415, 2.695, 4.995, 8.800 и 15.40 ГГц по данным наблюдений RSTN (Learmonth) 23 июля 2002 г. перед вспышкой класса X4.8. Ось абсцисс – время UT в часах, 0 соответствует моменту 00:00 UT 23 июля 2002 г. Ось ординат – полный поток радиоизлучения Солнца в SFU (Solar Flux Unit, $10^{-22}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$).

Основные выводы таковы. Данные RSTN, обеспечивающие непрерывный мониторинг радиоизлучения Солнца, пригодны для поиска и исследования эффекта предвспышечных КПФ. КПФ на более низких частотах (400–600 МГц) начинаются на 3–4 минуты позднее, чем на высоких частотах. КПФ на частотах 1.4–15.4 ГГц происходят практически синхронно. Наибольшая амплитуда КПФ наблюдается на частоте 4995 МГц.

Сделанные выводы совпадают с ранее полученными авторами результатами. В работе [26] было показано событие, в котором на частоте 17 ГГц предвспышечный цуг начинался примерно на две минуты раньше, чем цуг

в полном потоке по данным RSTN на частоте 245 МГц. В работе [27] в рассмотренных случаях КПФ на более низких частотах (200–600 МГц) начинаются позднее, чем на высоких частотах, на 2–6 минут.

Согласно расчетам, выполненным в [28], перед вспышкой, во время которой происходит выделение большого количества энергии во всем объеме магнитной петли, несколько раз может возникать плазменная неустойчивость в узком слое. Из-за малого объема этого слоя каждый раз выделяется небольшое количество энергии, которое оказывается заметным только в радиодиапазоне. Это и проявляется как повторяющиеся радиовсплески перед вспышкой.

Задержки цугов КПФ на низких частотах относительно более высоких частот показывают, что предвестники вспышек раньше проявляются в хромосфере.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 1021032422589-5.

Литература

1. *Durasova M.S., Kobrin M.M., Yudin O.I.* // *Nature*, 1971, **229**, 82.
2. *Кобрин и др.* // *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, 1973, **16**, 1350.
3. *Кобрин М.М. и др.* // *Солнечные данные*, 1973, N10, 79.
4. *Алешин В.И., Кобрин М.М., Коршунов А.И.* // *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, 1973, **16**, 747.
5. *Коршунов А.И., Прокофьева Н.А.* // *Солнечные данные*, 1976, N2, 52.
6. *Аверьянихина Е.А. и др.* // *Иссл. Солнца и красных звезд*. Рига, Зинатне, 1982, **16**, 61.
7. *Берулис И.И. и др.* // *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, 1973, **16**, 1362.
8. *Арбузов С.И.* // *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, 1979, **22**, 1165.
9. *Берулис И.И. и др.* // *АЖ*, 1983, **60**, 974.
10. *Авдюшин С.В. и др.* // *Доклады АН СССР*, 1985, т. 283, N1, с. 67.
11. *Zhdanov A.A., Charikov Y.E.* // *Soviet Astronomy Letters*, 1985, v. 11, p. 88.
12. *Tan V. et al.* // *Astrophys. J.*, 2016, **83**, id 206.
13. *Зимовец И.В. и др.* // *Геомагнетизм и Аэрномия*, 2022, т. 62, N4, с. 436.
14. *Bystrov et al.* // *Soviet Astronomy Letters*, 1978, v. 4, p. 76.
15. *Bystrov et al.* // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1979, v. 19, p. 197.
16. *Nakajima H. et al.* // *Proc. IEEE*, 1994, **82**, 705.
17. *Gelfreikh G.B., Nagovitsyn Yu.A., Nagovitsyna E.Yu.* // *Publ. Astr. Soc. Japan*, 2006, **58**, 29.
18. *Sych R., Nakariakov V.M., Karlicky M., Anfinogentov S.* // *A&A*, 2009, **505**, 791.
19. *Abramov-Maximov V.E., Gelfreikh G.B., Shibasaki K.* // *Solar Phys.*, 2011, **273**, 403.
20. *Абрамов-Максимов В.Е., Бакунина И.А.* // *Ядерная физика*, 2018, **81**, N 3, с. 366.
21. *Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A.* // *Geomag. and Aeronomy*, 2019, **59**, No. 7, 822.
22. *Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A.* // *Geomag. and Aeronomy*, 2020, **60**, No. 7, 846.
23. *Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A.* // *Geomag. and Aeronomy*, 2022, **62**, No. 7, 895.
24. *Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A.* // *Geomag. and Aeronomy*, 2023, **63**, No. 7, 916.
25. *Guidice D.A. et al.* // *Bull. AAS*, 1981, **13**, 553.
26. *Абрамов-Максимов В.Е., Бакунина И.А.* // *Труды XXVII Пулк.конф. ССЗФ-2023*, 7.
27. *Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A.* // *Geomag. and Aeronomy*, 2024, **64**, No.7, в печат.
28. *Solov'ev A.A., Kirichek E.* // *Astronomy Letters*, 2023, **49**, No. 5, 257.