ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

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

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

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Нижний Новгород, Россия

PRECURSORS OF SOLAR FLARES IN MICROWAVE RANGE

Abramov-Maximov V.E.¹, Bakunina I.A.²

¹Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia

²National Research University «Higher School of Economics», Nizhny Novgorod, Russia

We present four cases of quasi-periodic pulsations (QPPs) of microwave emission from solar active regions (ARs) on pre-flare phase. We used the Nobeyama Radioheliograph (NoRH) and Nobeyama Radio Polarimeters (NoRP) daily observations. We computed the time series of maximum brightness temperature and total flux over selected field-of-view (FOV) in three cases and total solar flux in one case. We found that in all considered cases an increase in the power of QPPs before flares is observed. The duration of pre-flare wavetrains in periods of oscillations is approximately the same for all cases and is about 5–10 pulses. The effect of the occurrence of the QPPs before flares can be interpreted as a relationship between MHD waves propagating along the magnetic flux tube of sunspot and beginning of the flares and can be considered as a flare precursor.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-11-14

Квазипериодические флуктуации (КПФ) солнечного радиоизлучения и их связь со вспышечной активностью, в частности, эффект появления или значительного усиления мощности КПФ перед вспышками, были обнаружены несколько десятилетий назад [1–10].

С использованием данных наблюдений радиогелиографа Нобеяма (NoRH) были детально исследованы КПФ микроволнового излучения с различными периодами [11, 12]. Был обнаружен ряд случаев возрастания мощности КПФ перед вспышками с периодами от 3-х до 100 минут [13–16]. Причем, во всех случаях длительность предвспышечных цугов в периодах колебаний оказалась примерно одинаковой. Аналогичный эффект был обнаружен в мягком рентгеновском излучении по данным GOES [17].

Целью данной работы является дальнейшее исследование обнаруженного эффекта усиления КПФ перед вспышками. В работе рассматриваются 4 события: SOL2011-07-30T02:09 (вспышка M9.3 в АО 11261), SOL2011-09-25T02:33 (вспышка M4.4 в АО 11302), SOL2012-03-09T03:53 (вспышка M6.3 в АО 11429) и SOL2003-11-03T01:09 (вспышка X2.7 в АО 10488).

Для работы были использованы ежедневные наблюдения Солнца, выполненные на NoRH на частоте 17 ГГц (1.76 см) и на Радиополяриметрах Нобейяма (Nobeyama Radio Polarimeters – NoRP). Разные события были обработаны немного различными методами, в частности, для того, чтобы сравнить степень трудоемкости различных подходов и выбрать наиболее подходящий для накопления статистики. Для первого события был выполнен синтез радиоизображений в нестандартном режиме с шагом и временем 10 сек по алгоритму Koshix. Для второго события синтез выполнялся с шагом 1 мин. Для третьего события специальный синтез не производился, использовались готовые изображения в fits-формате с шагом 3 мин, свободно доступные по адресу <https://solar.nro.nao.ac.jp/norh/fits/3min/>. Далее для построения временного профиля микроволнового излучения на всех изображениях выделялась исследуемая АО (field-of view – FOV) с учетом вращения Солнца и вычислялась или максимальная яркостная температура по FOV, или плотность потока радиоизлучения.

Для 4-го события использовались данные наблюдений NoRP. С одной стороны NoRP дает только полный поток от всего Солнца, что значительно уменьшает относительную амплитуду флуктуаций и не дает возможности исследовать пространственное распределение флуктуаций. С другой стороны, наблюдения на NoRP выполняются на 7 частотах (1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35, 80 GHz), данные NoRP доступны в формате XDR и не требуют никакой предварительной обработки. Немаловажно с точки зрения разработки прогностических критериев, что наблюдения на NoRP продолжаются, в то время как наблюдения на NoRH были прекращены 31 марта 2020 г.

Рис. 1. *Левая панель:* Временной профиль микроволнового излучения АО NOAA 11261 на волне 1.76 см в интенсивности (параметр Стокса I, проинтегрированный по FOV поток излучения) по наблюдениям на радиогелиографе Нобейяма 30 июля 2011 г. Красным цветом обозначен предвспышечный фрагмент профиля, показанный крупно на правой панели. *Правая панель:* Фрагмент временного профиля (вычтена постоянная составляющая) микроволнового излучения АО NOAA 11261, обозначенный на левой панели красным цветом. Вертикальной синей линией показан момент появления предвспышечных флуктуаций. На обеих панелях оси абсцисс – время в минутах, оси ординат – поток радиоизлучения АО в sfu.

На рис. 1 показаны предвспышечные флуктуации для события SOL2011-07-30T02:09. Перед вспышкой класса M9.3 выделяется цуг флуктуаций с периодами 3–4 минуты длительностью примерно 40 минут. На рис.2 показано событие SOL2011-09-25T02:33. Видно, что в течение примерно 150 минут перед вспышкой класса M4.4 наблюдается цуг флуктуаций с периодами около 30–40 минут. Аналогичная картина наблюдается и для события SOL2012-03-09T03:53, показанного на рис. 3.

Рис. 2. *Левая панель:* Временной профиль микроволнового излучения АО NOAA 11302 на волне 1.76 см в интенсивности (параметр Стокса I, максимальная яркостная температура по FOV) по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма 25 сентября 2011 г. Красным цветом обозначен предвспышечный фрагмент профиля, показанный крупно на правой панели. *Правая панель:* Фрагмент временного профиля микроволнового излучения АО NOAA 11302, обозначенный на левой панели красным цветом. На обеих панелях оси абсцисс – время в минутах, оси ординат – максимальная яркостная температура по FOV.

Рис. 3. *Левая панель:* Временной профиль микроволнового излучения АО NOAA 11429 на волне 1.76 см в интенсивности (параметр Стокса I, максимальная яркостная температура по FOV) по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма 9 марта 2012 г. Красным цветом обозначен предвспышечный фрагмент профиля, показанный крупно на правой панели. *Правая панель:* Фрагмент временного профиля микроволнового излучения АО NOAA 11429, обозначенный на левой панели красным цветом. На обеих панелях оси абсцисс – время в минутах, оси ординат – максимальная яркостная температура по FOV.

Для события SOL2003-11-03T01:09 четко выделяется цуг длительно-стью около 1 часа с флуктуациями 10–15 минут.

Рис. 4. Фрагмент записи полного потока радиоизлучения Солнца на волне 15 см по наблюдениям на Радиополяриметре Нобеяма 3 ноября 2003 г. перед вспышкой X2.7 в АО 10488. Ось абсцисс – время UT в часах, ось ординат – полный поток радиоизлучения Солнца в sfu. Вертикальной синей линией показан момент появления предвспышечных флуктуаций.

Таким образом, в 4-х рассмотренных случаях выявлены предвспышечные цуги флуктуаций микроволнового излучения длительностью 4–10 импульсов с различными квазипериодами (от 3-х до 40 минут). Эффект может быть интерпретирован как связь МГД-волн, распространяющихся вдоль силовой трубки пятна, и началом солнечной вспышки.

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема 0041-2019-0019).

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. Алешин В.И., Кобрин М.М., Коршунов А.И. // *Изв. ВУЗов, Радиофизика*, 1973, **16**, 747.
4. Кобрин М.М. и др. // *Солнечные данные*, 1973, N10, 79.
5. Кобрин М.М. и др. // *Астр. циркуляр*, 1981, N1201, 1.
6. Аверьянихина Е.А. и др. // *Исследование Солнца и красных звезд*. Рига, Зинатне, 1982, вып. 16, с. 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. Gelfreikh G.B., Grechnev V.V., Kosugi T., Shibasaki K. // *Solar Phys.*, 1999, **185**, 177.
12. Gelfreikh G.B., Nagovitsyn Yu.A., Nagovitsyna E. Yu. // *Publ. Astr. Soc. Japan*, 2006, **58**, 29.
13. Sych R., Nakariakov V.M., Karlicky M., Anfinogentov S. // *A&A*, 2009, **505**, 791.
14. Abramov-Maximov V.E., Gelfreikh G.B., Shibasaki K. // *Solar Phys.*, 2011, **273**, 403.
15. Абрамов-Максимов В.Е., Бакунина И.А. // *Ядерная физика*, 2018, **81**, N 3, с. 366.
16. Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. // *Geomag. and Aeronomy*, 2019, **59**, No. 7, 822.
17. Tan B. et al. // *Astrophys. J.*, 2016, **83**, id 206.