ЧАСТОТА ВСТРЕЧАЕМОСТИ ПРЕДВСПЫШЕЧНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

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

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

[2]*Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",*

г. Нижний Новгород, Россия

e-mail: beam@gaoran.ru

Мы представляем исследование частоты встречаемости квазипериодических флуктуаций (КПФ) микроволнового излучения активных областей Солнца на предвспышечной стадии. В работе использованы корреляционные кривые, полученные на радиогелиографе Нобеяма (NoRH). Мы проанализировали 529 вспышек классов X, M и C (по классификации GOES). В значительном количестве рассмотренных событий (примерно 75% мощных вспышек и 50% более слабых вспышек) наблюдаются предспышечные флуктуации микроволнового излучения длительностью до 10 импульсов. Характер предвспышечных флуктуаций в различных случаях разный. В некоторых случаях наблюдаются практически гармонические колебания. В большинстве случаев флуктуации носят спорадический характер и выглядят как последовательность слабых вспышек. Возможно, природа предвспышечных КПФ в различных случаях разная.

1. ВВЕДЕНИЕ

Связь параметров квазипериодических флуктуаций (КПФ) микроволнового излучения Солнца (Durasova et al., 1971) со вспышечной активностью была обнаружена более 50-ти лет назад (Kobrin et al., 1973; Aleshin et al., 1973). В частности, был обнаружен эффект усиления мощности КПФ микроволнового излучения непосредственно перед вспышкой (Berulis et al., 1973; Arbuzov, 1980; Aver'yanikhina et al., 1982; Berulis et al., 1983; Avdyushin et al., 1985). Более того, был обнаружен аналогичный эффект усиления пульсаций геомагнитного поля перед протонными вспышками и его связь с пульсациями радиоизлучения Солнца (Bystrov et

al., 1978; Bystrov et al., 1979). Подобный эффект усиления КПФ перед вспышками наблюдается также в мягком рентгеновском излучении (Zhdanov and Charikov, 1985; Tan et al., 2016, Zimovets et al, 2022).

Ряд случаев возрастания мощности КПФ перед вспышками с периодами от нескольких десятков секунд до нескольких десятков минут был обнаружен с использованием данных наблюдений на радиогелиографе Нобеяма (NoRH) (Gelfreikh et al., 1999, 2006; Shibasaki, 2001; Sych et al., 2009; Abramov-Maximov et al., 2011, Abramov-Maximov and Bakunina, 2018, 2019, 2020).

Целью данной работы является исследование частоты встречаемости эффекта усиления мощности КПФ перед вспышкой.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Для работы были использованы наблюдения Солнца, выполненные на NoRH (Nakajima et al., 1994) на частоте 17 ГГц (1.76 см) в интенсивности (параметр Стокса I). В наших предыдущих работах мы выполняли синтез радиоизображений по нестандартной методике, что требует значительного времени и поэтому не позволяет рассмотреть быстро большое количество событий. 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, $10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$) плотности потока. Использование корреляционных кривых позволяет быстро проанализировать большое количество событий. При этом надо учитывать, что это усредненная характеристика. Если два и более события происходят одновременно в разных активных областях, мы не сможем их разделить, что ограничивает количество вспышек, которые мы можем проанализировать. С другой стороны, эта “усредненность” позволяет предположить, что часть предвспышечных КПФ в корреляционных кривых мы не видим, но реально они есть и были бы обнаружены при ана-

лизе двумерных изображений с высоким пространственным разрешением. Т.е. из анализа корреляционных кривых мы получаем нижнюю границу оценки количества событий с предвспышечными КПФ.

Мы отобрали все вспышки классов X, M и C (по GOES), которые произошли с 1992 по 2015 гг. в интервале времени наблюдений NoRH (23:00–06:00 UT). Примерно половина из них оказалась непригодна для анализа из-за наличия большого количества слабых вспышек (класса B по GOES и слабее) и слабых радиовсплесков перед исследуемой вспышкой, что приводило к невозможности выделить предвспышечные флуктуации. Основным критерием отбора было наличие “спокойного” участка корреляционной кривой перед вспышкой. Под “спокойным” мы понимаем такой участок корреляционной кривой, на котором нет ни КПФ, ни слабых вспышек (радиовсплесков). Кроме того, мы отбрасывали те события, в которых наблюдались флуктуации перед вспышкой в течение всего интервала наблюдений, т.е. нельзя было определить момент появления флуктуаций.

Среди исследователей нет единого мнения, какие вспышки считать мощными. Часто к мощным вспышкам относят вспышки класса M5 и мощнее. Поэтому вспышки класса M мы разделили на две группы (слабее M5 и мощнее) и рассмотрели их раздельно.

Всего было проанализировано 529 событий классов X, M и C, удовлетворяющих нашим критериям отбора. На рис. 1 и 2 приведены два примера. В таблице приведена количественная сводка. Во втором столбце дано число вспышек классов X, в третьем – вспышки классов M5 – M9, в четвертом – классов M1 - M5, в пятом – класса C.

Из таблицы видно, что для событий класса M5 и мощнее предвспышечные КПФ наблюдаются в 70–75% случаев. Для более слабых вспышек (<M5 и C) предвспышечные КПФ выявлены примерно в половине событий. Возможно, что причина этого в том, что перед слабыми вспышками КПФ тоже более слабые, и их труднее обнаружить. Но нельзя исключать, что это проявление различных физических процессов при подготовке вспышек разной мощности.

Отметим, что по характеру флуктуаций все события можно разделить на два класса. В одних случаях наблюдаются почти гармонические колебания (рис.1), в других – КПФ выглядят, скорее, как последовательность слабых вспышек (рис. 2). На основе этого факта можно предположить, что в различных случаях КПФ являются проявлениями различных процессов, происходящих на начальных этапах развития солнечных вспышек. В тех случаях, в которых КПФ выглядят как гармонические, они могут отражать волновые процессы в активных областях. В случаях с нерегулярными КПФ, возможно, пульсации являются проявлением процессов ускорения частиц. Следует отметить, что вывод о разделении КПФ на два типа предварителен, поскольку сделан на основе визуального анализа, и, конечно же, субъективен. Необходимы дальнейшие исследования с применением строгих математических методов, например, вейвлет-анализа или метода EMD.

3. ВЫВОДЫ

По данным корреляционных кривых у 50-75% рассмотренных событий разной мощности наблюдаются предвспышечные флуктуации микроволнового излучения. Предвспышечные КПФ выявлены в 75% мощных событий (M5 и мощнее) и в 50% более слабых событий (слабее M5). 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. Возможно, в разных событиях КПФ имеют разную природу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Features of Short-Period Oscillations of Microwave Emission from the Solar Active Region before the Flare // Physics of Atomic Nuclei. V. 81. № 3. P. 379-383. 2018.

Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Oscillations of the Microwave Emission of Solar Active Region 12673 before Flares // Geomagnetism and Aeronomy. V. 59. No. 7. P. 822-826. 2019.

Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Solar-Flare Precursors in the Microwave Range // Geo-

magnetism and Aeronomy. V. 60. No. 7. P. 846-852. 2020.

Abramov-Maximov V.E., Gelfreikh G.B., Shibasaki K. Quasi-periodic Oscillations of Solar Active Regions in Connection with Their Flare Activity - NoRH Observations // Solar Phys. V. 273. P. 403-412. 2011.

Aleshin V.I., Kobrin M.M., Korshunov A.I. Quasiperiodic Components with Periods of from 30 to 60 min in the Fluctuation Spectra of Solar Radio Emission at the 3 cm Wavelength // Radiophysics and Quantum Electronics. V. 16. № 5. P. 571-576. 1973.

Arbuzov S.I. Flare-associated variations in the spectral slope of radio emission (λ≈3 cm) from solar active regions // Radiophysics and Quantum Electronics. V. 22. № 10. P. 803-811. 1980.

Avdyushin S.I., Bogomolov A.F., Borisova E.A., et al. Relationship between solar activity and the radio-emission characteristics of solar active regions // Akademiia Nauk SSSR, Doklady (ISSN 0002-3264). V. 283. №. 1. P. 67-70. 1985. In Russian.

Aver'yanikhina E., Paupere M., Ozólinš G., Eliass M. On the character of amplitude change of intensity fluctuations of solar radio radiation in the decimeter band before powerful radio bursts which are connected with flares // Issled. Solntsa i Krasnykh Zvezd. №. 16. P. 61-74. 1982. In Russian.

Berulis I. I., Molchanov A.P., Olyanyuk V.P., et al. The Spectral Index and Fluctuations of Solar Radioemission at the λ≈3 cm Wavelength // Radiophysics and Quantum Electronics. V. 16. № 9. P. 1047-1049. 1973.

Berulis I.I., Kozlovskii A.L., Losovskii B.Y., et al. Fluctuations of the Radio Emission of Local Sources on the Sun Based on Observations on the RT-22 Radio Telescope of the Lebedev Institute // Soviet Astronomy. V. 27. №. 5. P. 563-567. 1983.

Bystrov M.V., Kobrin M.M., Snegirev S.D. Pulsations of the geomagnetic field prior to solar proton flares // Soviet Astronomy Letters. V. 4. P. 76-77. 1978.

Bystrov M.V., Kobrin M.M., Snegirev S.D. Quasi-periodic pulsations of the earth's magnetic field with periods of 20–200 min. and their connection with analogous pulsations in the solar radio

emission before proton bursts // Geomagnetism and Aeronomy. V. 19. P. 197-199. 1979.

Durasova M.S., Kobrin M.M., Yudin O.I. Evidence of Quasi-periodic Movements in the Solar Chromosphere and Corona // Nature. V. 229. № 3. P. 82-84. 1971.

Gelfreikh G.B., Grechnev V.V., Kosugi T., Shibasaki K. Detection of Periodic Oscillations in Sunspot-Associated Radio Sources // Solar Phys. V. 185. P. 177-191. 1999.

Gelfreikh G.B., Nagovitsyn Yu.A., Nagovitsyna E.Yu. Quasi-Periodic Oscillations of Microwave Emission in Solar Active Regions // Publ. Astr. Soc. Japan. V. 58. P. 29-35. 2006.

Kobrin M.M., Pakhomov V.V., Durasova M.S., et al. Fluctuations of Solar Radioemission at the 3-cm Wavelength Using Two Radiotelescopes That Are Spaced 1500 km Apart // Radiophysics and Quantum Electronics. V. 16. № 9. P. 1036-1039. 1973.

Nakajima H., Nishio M., Enome S. et al. The Nobeyama Radioheliograph // Proc. IEEE. V. 82, P. 705-713. 1994.

Shibasaki K. Microwave Detection of Umbral Oscillation in NOAA Active Region 8156: Diagnostics of Temperature Minimum in Sunspot // The Astrophysical Journal. V. 550. P. 1113-1118. 2001.

Sych R., Nakariakov V.M., Karlicky M., Anfinogentov S. Relationship between wave processes in sunspots and quasi-periodic pulsations in active region flares // Astronomy and Astrophysics. V. 505. P. 791-799. 2009.

Tan B., Yu Z., Huang J., Tan C., Zhang Y. Very Long-period Pulsations before the Onset of Solar Flares // The Astrophysical Journal. V. 833. Article id. 206. 6 pp. 2016.

Zhdanov A.A., Charikov Y.E. Power-spectrum analysis of preflare solar X rays // Soviet Astronomy Letters. V. 11. P. 88-90. 1985.

Zimovets I.V., Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Nizamov B.A. Sources of Long-Period X-ray Pulsations before the Onset of Solar Flares // Geomagnetism and Aeronomy. V. 62. No. 4. P. 356-374. 2022.

Таблица. Количество событий с предвспышечными КПФ и без них.

	X	M5 – M9	M1 – M5	C	Всего
Есть КПФ	32 (71%)	63 (75%)	103 (53%)	110 (53%)	308
Нет КПФ	13 (29%)	21 (25%)	91 (47%)	96 (47%)	221
Всего	45	84	194	206	529

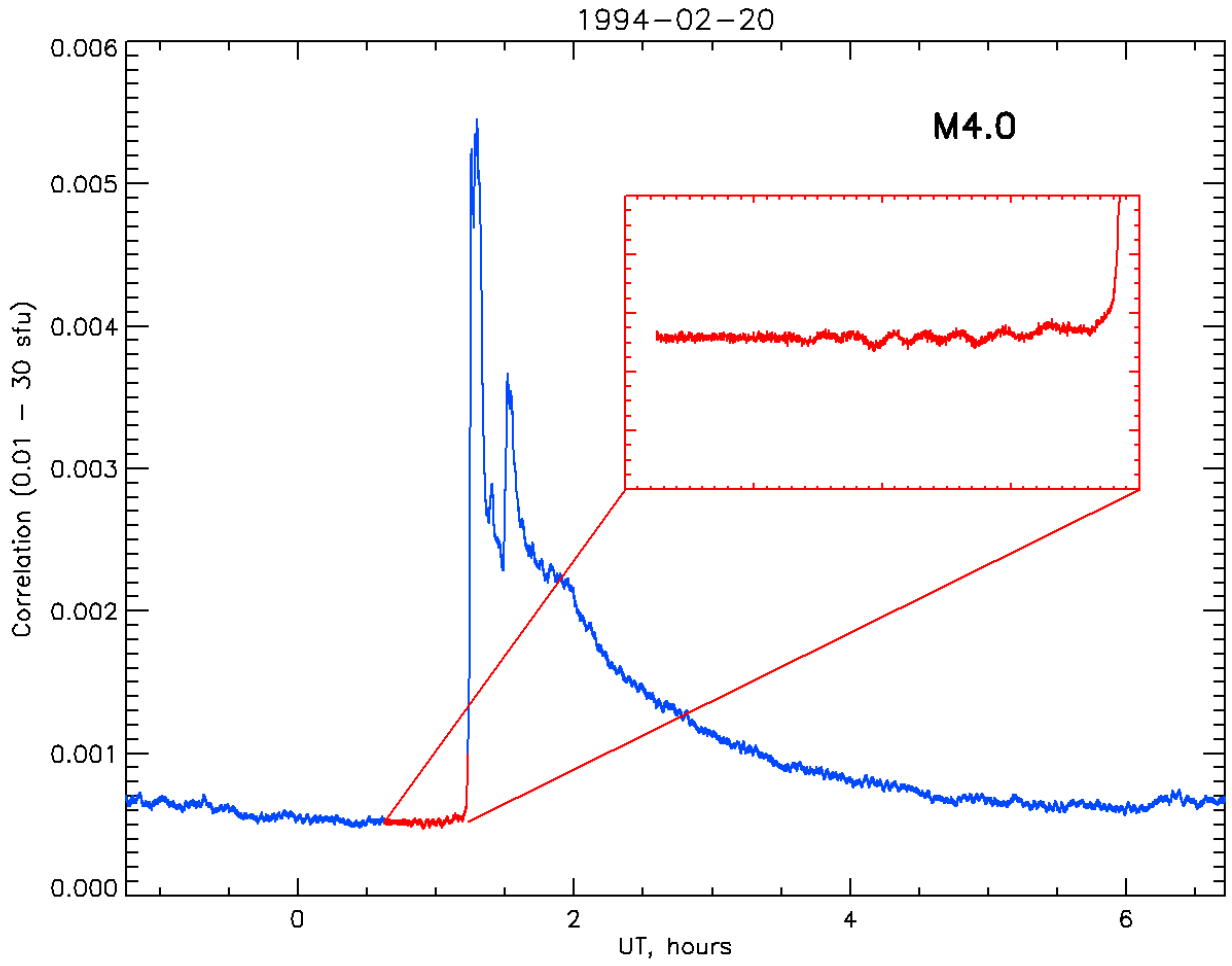

Рисунок 1. Корреляционная кривая (синяя кривая), полученная на радиогелиографе Нобеяма 20 февраля 1994 г. Ось абсцисс – время UT в часах, 0 соответствует моменту 00:00 20.02.1994. Ось ординат – корреляция, нормированная на 1 (0.01 соответствует 30 SFU (Solar Flux Unit, $10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$). На корреляционной кривой красным цветом выделен предвспышечный цуг перед вспышкой класса M4.0. Этот фрагмент показан отдельно на красной вставке.

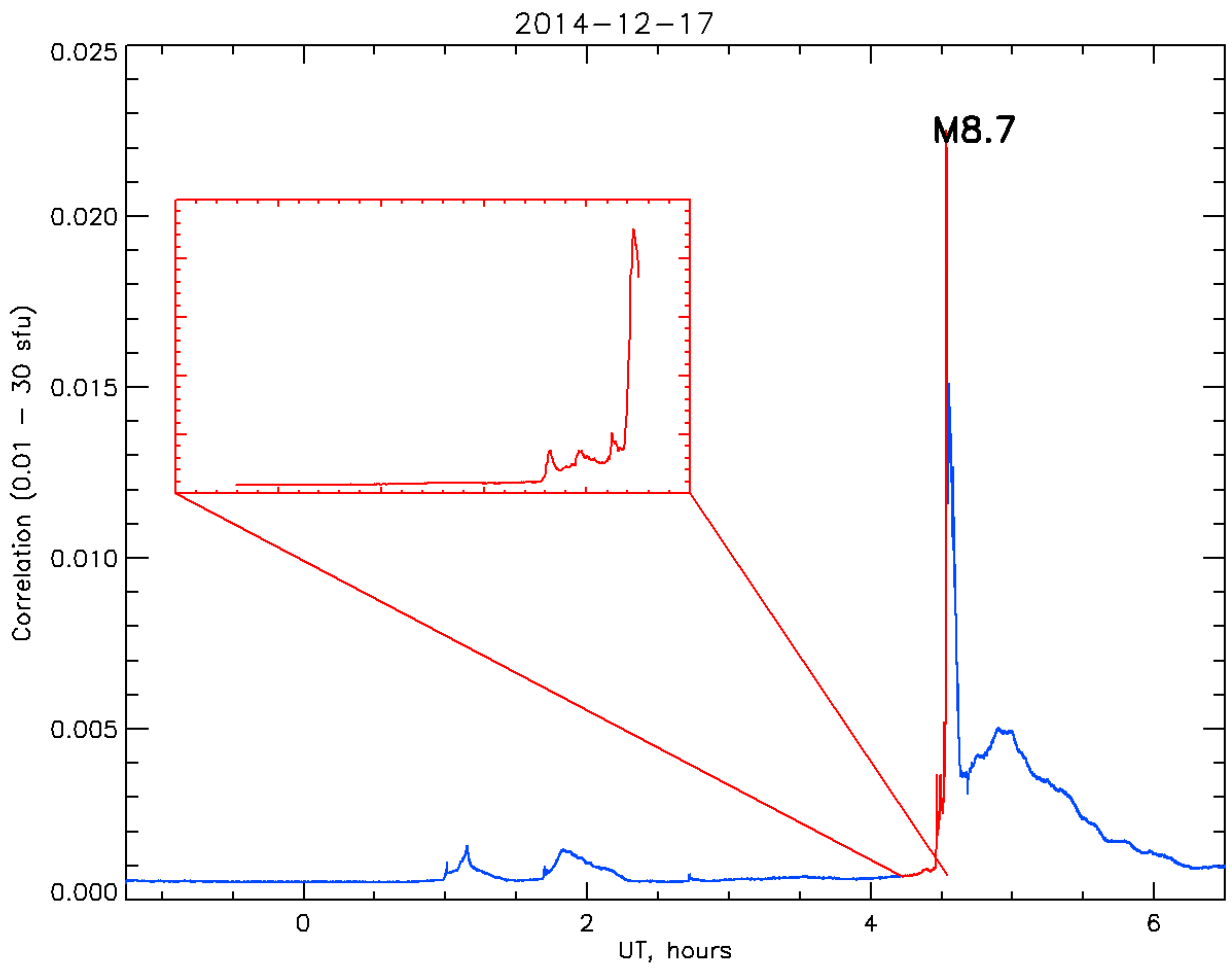

Рисунок 2. Корреляционная кривая (синяя кривая), полученная на радиогелиографе Нобеяма 17 декабря 2014 г. Ось абсцисс – время UT в часах, 0 соответствует моменту 00:00 17.12.2014. Ось ординат – корреляция, нормированная на 1 (0.01 соответствует 30 SFU (Solar Flux Unit, $10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$). На корреляционной кривой красным цветом выделен предвспышечный цуг перед вспышкой класса M8.7. Этот фрагмент показан отдельно на красной вставке.