

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ «БАСТИЛИЯ»

Копылова Ю. Г.¹, Цап Ю. Т.², Цветков Л. И.²

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

² Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный, Крым, Украина

На основе наблюдательных данных, полученных с помощью радиотелескопа RT-22 Крымской астрофизической обсерватории, а также орбитальных космических станций «Yohkoh», SOHO и TRACE, проведен анализ излучения солнечной вспышки «Бастилия». Из сопоставления изображений вспышки в ультрафиолетовом и жестком рентгеновском диапазоне установлено, что смена знака круговой поляризации микроволнового излучения произошла вследствие смещения источника ускоренных электронов из западной части активной области в восточную. Наблюдаемые задержки между пиками временных профилей жесткого рентгеновского и микроволнового излучения обсуждаются в рамках модели коронального пробкотрона с развитой электромагнитной турбулентностью.

1. Введение

14 июля 2000 г. в активной области NOAA 9077 около 10 UT произошла солнечная вспышка класса X5.7/B3, названная «Бастилией», которая оказалась наиболее мощным протонным событием, начиная с 1989 г. В течение часа вспышка сопровождалась излучением в широком диапазоне длин волн, эрупцией волокна, корональным выбросом массы, ударными волнами, а также значительным ростом потока ускоренных частиц в межпланетном пространстве. Хотя «Бастилия» наблюдалась на многих инструментах, имеются крайне скудные данные о ее микроволновом излучении на частотах, превышающих 8 ГГц. Между тем анализ излучения в этом диапазоне частот позволяет сделать ряд важных выводов об особенностях ускорения и распространения электронов в области первичного энерговыделения [1, 2].

Микроволновое излучение вспышек определяется электронами с энергиями выше 300 кэВ (гиротронный механизм), тогда как жесткое рентгеновское вызывают быстрые электроны с энергиями 10–200 кэВ (тормозной механизм) [1]. Как правило, временные профили потоков микроволнового и жесткого рентгеновского излучения хорошо коррелируют между собой, что свидетельствует о единой популяции низкоэнергичных и высокоэнергичных электронов. Однако довольно часто наступление пиков микроволнового излучения несколько запаздывает по отношению к пикам жесткого рентгеновского излучения. Это интерпретируется либо в рамках модели коронального пробкотрона (trap-plus-precipitation model) [4], либо на основе представлений о двухступенчатом ускорении заряженных частиц [5]. Имеющиеся наблюдательные данные не позволяют сделать заключение о том, какой из подходов более адекватен.

В активных областях солнечной атмосферы иногда наблюдается смена знака круговой поляризации микроволнового излучения, которая может быть вызвана следующими причинами: 1) распространением волн через квазипоперечные магнитные поля;

2) изменением параметров плазмы; 3) смещением источника излучения; 4) перестройкой магнитного поля. Вопрос о том, какой из механизмов реализуется в солнечных вспышках, по-прежнему остается открытым.

Мощные вспышки в отличие от слабых происходят в активных областях, обладающих сложной магнитной конфигурацией, что существенно ограничивает возможность применения простых моделей для объяснения тех или иных физических явлений. С другой стороны, многие важные особенности излучения значительно более ярко выражены в случае мощных событий. Так, например, благодаря «Бастилии» впервые удалось обнаружить двухленточные структуры в жестком рентгеновском диапазоне [3], подобные тем, которые видны в линии H_{α} . Поэтому для лучшего понимания физической сущности вспышечных явлений анализ мощных событий приобретает особую ценность. К тому же такие вспышки определяют космическую погоду в межпланетном пространстве и вызывают магнитные бури.

2. Методика наблюдений и обработка

Наблюдения проводились с помощью диагностического комплекса, созданного на базе 22-м радиотелескопа Крымской астрофизической обсерватории и четырехволнового поляриметра. Угловое разрешение радиотелескопа на волнах 2.0, 2.3, 2.8 и 3.5 см составляет 3.6', 4.1', 5.0' и 6.0' соответственно [6]. Поляриметр позволяет регистрировать одновременно на четырех волнах полную интенсивность $I = I_R + I_L$ и параметр Стокса $V = I_R - I_L$, где I_R и I_L — интенсивности микроволнового излучения правой и левой круговой поляризации. Чувствительность радиотелескопа составляет 0.1 с.е.п. (1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/м² Гц), а наименьшее временное разрешение — около 0.1 с. В наблюдениях 14 июля 2000 г. были задействованы поляриметры для волн 2.0, 2.3 и 3.5 см, что соответствует частотам 15.4, 13.3 и 8.6 ГГц.

Процесс наблюдений заключался в сканировании диска Солнца по прямому восхождению с шагом по склонению 2', последующим наведением антенны по максимуму радиоизлучения локального источника на самой короткой длине волны и слежением за выбранной активной областью. Выбор объекта наблюдений осуществлялся в результате оценки прогностических параметров для каждого из источников, обнаруженных на диске Солнца по результатам сканирования.

Система управления РТ-22, сбора и обработки информации с выходов поляриметров создана на базе аппаратуры КАМАК и ЭВМ РС/486 [7]. Регистрация сигналов выполнялась путем последовательного преобразования аналогового сигнала для каждого из шести низкочастотных каналов поляриметрического комплекса, подаваемых на АЦП через аналоговый коммутатор с частотой коммутации 100 ГГц и накоплением сигнала 1 с. Усредненные данные записывались на магнитный носитель. Обработка данных проводилась по программе, разработанной А.В.Мельниковым (ГАО РАН), включающей нормировку, учет паразитных сигналов, а также пересчет в солнечные единицы потока.

2. Результаты наблюдений

До начала вспышки уровень излучения в активной области NOAA 9077 на 100–150 % превышал уровень излучения спокойного Солнца. Поляризация радиоизлучения локального источника имела знак L в восточной его части и знак R — в западной. В ходе вспышечного энерговыделения из-за слишком больших величин плотностей потоков F вблизи максимумов ($>10^4$ с.е.п.) произошел сбой в работе аппаратуры. Тем не менее, интерполируя, можно заключить, что на частотах менее 15.4 ГГц показатель спектра микроволнового излучения был положительным. Особо подчеркнем, что в ходе вспышечного энерговыделения параметр $V = F_L - F_R$ (рис. 1), изменил знак с положительного на отрицательный. Если в начальной стадии развития вспышки преобладало излучение с левой круговой поляризацией, то к 10:24 UT во всех частотных каналах излучение с правой поляризацией стало определяющим. Смена знака на частоте 15.4 ГГц произошла на несколько минут раньше, чем на остальных каналах. Вместе с тем степень поляризации на протяжении всей вспышки в среднем была невысокой и достигла своего максимального значения на частоте 8.6 ГГц около 10:28 UT, составив 25 %.

3. Обсуждение

Диаграмма направленности антенны RT–22 значительно превосходит характерные угловые размеры источников микроволнового излучения, которые обычно не превышают несколько десятков угловых секунд. Вместе с тем хорошо известно, что жесткое рентгеновское излучение, как и микроволновое, генерируется во вспышечных петлях [1], концентрируясь в области их оснований. Считается, что оно вызывается ускоренными электронами, которые проникают в плотные слои солнечной хромосферы, вызывая эффективный нагрев и испарение плазмы, дающей значительный вклад в ультрафиолетовое излучение [8]. Поэтому источники микроволнового излучения солнечных вспышек находятся в непосредственной близости от источников жесткого рентгеновского и ультрафиолетового излучения или совпадают с ними.

Исходя из сказанного выше и используя изображения вспышки в линии Fe XII (19.1 нм, $1.5 \cdot 10^6$ К), а также в канале M_2 (33–53 кэВ), полученные соответственно на спутниках TRACE и Yohkoh в 10:22 и 10:29 UT, мы пришли к заключению, что смена знака круговой поляризации микроволнового излучения происходила в момент смещения источника ускоренных электронов из западной части активной области в восточную (см. также [9]). Кроме того, согласно магнитограммам MDI (SOHO) источники ускоренных электронов в 10:22 и 10:29 UT находились в областях, обладающих различными магнитными конфигурациями. По нашему мнению, это и стало причиной наблюдаемой смены знака круговой поляризации микроволнового излучения.

Сравнение временных профилей потоков микроволнового и жесткого рентгеновского показало, что рентгеновское излучение достигло максимального значения около 10:27 UT [5], тогда как микроволновое — более чем на минуту позже (рис. 2).

Между тем временные профили жесткого рентгеновского и микроволнового излучения имеют много общего, что свидетельствует в пользу единой популяции низкоэнергичных и высокоэнергичных электронов. Также отметим, что наступление пиков микроволнового излучения отстает от соответствующих пиков жесткого рентгеновского излучения, и по мере развития вспышки время запаздывания увеличивается.

Наблюдаемые особенности поведения профилей трудно объяснить на основе представлений о двухступенчатом ускорении заряженных частиц, поскольку даже в значительно более слабых событиях высокоэнергичные электроны способны ускоряться за несколько секунд [8]. По нашему мнению, несоответствие поведения профилей можно объяснить в рамках модели коронального пробкотрона с развитой электромагнитной турбулентностью [4, 10], суть которой состоит в следующем. Если магнитную петлю представить в виде магнитной ловушки (коронального пробкотрона), заполненной ускоренными электронами, то за микроволновое излучение будут ответственны захваченные электроны, тогда как за жесткое рентгеновское — пролетные. Характерное время жизни электронов в ловушке определяется их взаимодействием с турбулентными пульсациями, причем с ростом энергии электронов в режимах слабой и сильной питч–угловой диффузии оно увеличивается [4]. Вследствие этого, после включения импульсного источника частиц, высокоэнергичные электроны будут накапливаться в магнитной ловушке более длительное время, чем низкоэнергичные, так как последние рассеиваются турбулентными пульсациями гораздо эффективнее. Именно это обстоятельство может приводить к наблюдаемым временным задержкам. Однако для слабой диффузии характерное время жизни захваченных электронов с повышением уровня турбулентности падает [4], что противоречит увеличению продолжительности временных задержек на фазе роста излучения. Поэтому в рассматриваемом событии должен реализоваться режим сильной диффузии [10]. Его физическая сущность состоит в том, что при достаточно высоком уровне турбулентности захваченные электроны, даже оказавшись в конусе потерь, будут испытывать многократное рассеяние, препятствующее их свободному выходу из магнитной ловушки. Впервые данная идея была предложена более 30 лет назад Будкером и др. [11] для решения проблемы удержания высокотемпературной столкновительной плазмы.

4. Заключение

В представленной работе проведен анализ микроволнового излучения солнечной вспышки 14 июля 2000 г. («Бастилия») на частотах 8.6, 13.3 и 15.4 ГГц. На основе наблюдательных данных, полученных в ультрафиолетовом и жестком рентгеновском диапазоне, показано, что смена знака круговой поляризации микроволнового излучения произошла вследствие смещения источника ускоренных электронов из западной части активной области в восточную, обладающей иной магнитной конфигурацией.

Временные задержки между пиками микроволнового и жесткого рентгеновского излучения мы объяснили в рамках модели коронального пробкотрона. Причем в рассматриваемом событии реализовался режим сильной диффузии, который обеспечивал

наблюдаемый рост временных задержек между пиками жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, а также эффективное накопление высокоэнергичных частиц в нижней короне Солнца.

Авторы выражают свою признательность К. Л. Кляйну, Х. Хадсону и В. Б. Юрчишину за предоставленные материалы.

1. Bastian T. S.//*Proceedings of the Nomeyama Symposium, NRO 479*, Eds. Bastian T., Gopalswamy N., Shibasaki K., Japan., 1998. pp. 211–212.
2. Цап Ю. Т., Копылова Ю. Г., Нестеров Н. С.//*Кинематика и физика небесных тел*, т. **18**, 2002, с. 3–17.
3. Masuda S., Kosugi T., Hudson H.S.//*Solar Phys.*, vol. **204**, 2001, pp. 55–68.
4. Степанов А. В., Цап Ю. Т.//*Астрон. журн.*, т. **76**, №12, 1999, с. 949–960.
5. Bai T., Ramaty R.//*Astrophys. J.*, vol. **227**, №2, 1979, pp. 1072–1081.
6. Цветков Л. И., Миронов М. А., Поздняков М. М., Бачурин А. Ф.//*Изв. Крым.астрофиз. обсерватории*, т. **88**, 1993. с. 146–152.
7. Баранов Н. В., Миронов М. А., Никитин П. С., Цветков Л. И.//*Кинематика и физика небесных тел*, т. **14**, 1998, с.89–96.
8. Цап Ю. Т.//*Изв. Крым. астрофиз. обсерватории*, т. **96**, 2000. с. 165–175.
9. Klein K.-L., Trotter G., Lantos P. Delaboudiniere J.-P.//*Astron. & Astrophys.* vol. **373**, 2001. pp 1073–1082.
10. Bessalov P. A., Zaitsev V. V., Stepanov A. V.//*Astrophys. J.*, vol. **374**, 1991, pp. 369–373.
11. Будкер Г. И., Мирнов В. И., Рютов Д. Д.//*Письма в ЖЭТФ*. т. **14**, 1971, с. 320–322.

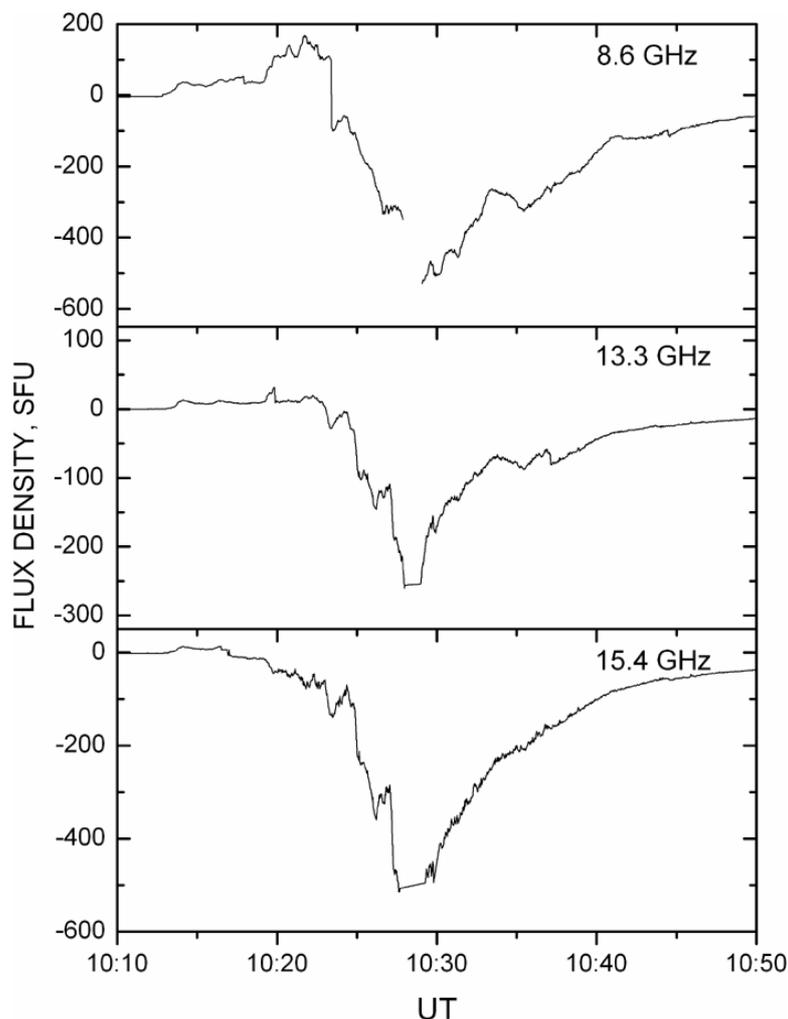


Рис. 1. Временные профили параметра $\tilde{V} = F_L - F_R$, полученные на частотах 8.6, 13.3 и 15.4 ГГц

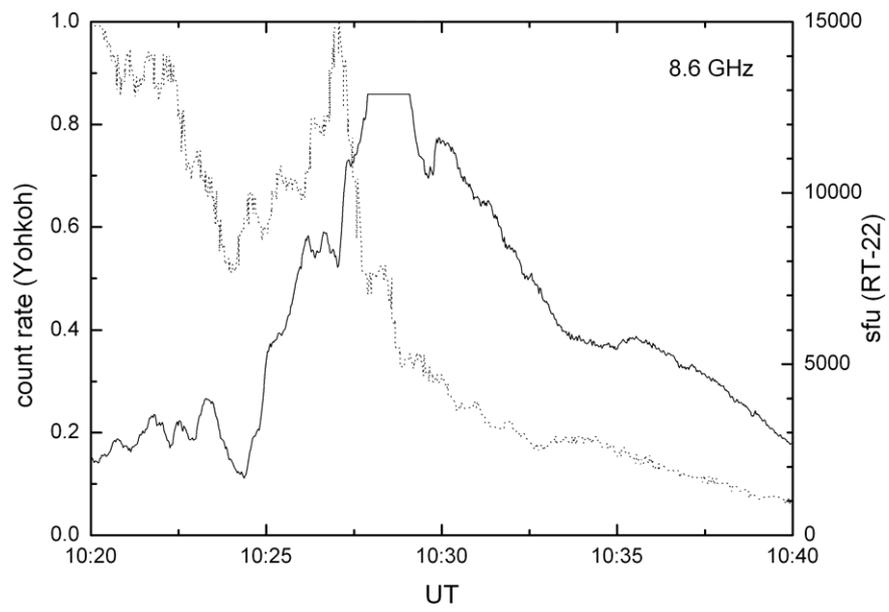


Рис. 2. Временные профили потоков жесткого рентгеновского (пунктирная линия) и микроволнового (сплошная линия) излучения, полученные в канале M_1 (23–33 кэВ) и на частоте 8.6 ГГц