

УДК 523.985

Развитие всплывающих процессов и особенности тонкой структуры солнечного радиоизлучения

Г.П. Чернов, В.В. Фомичев

ФГБУН “Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН” (ИЗМИРАН), г. Троицк, Москва, 142190
gchernov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. С помощью всех доступных данных наземных и спутниковых наблюдений выясняется причина появления различных элементов тонкой структуры солнечных радиовсплесков в дециметровом и микроволновом диапазонах волн. В некоторых явлениях быстрые пульсации, зебра-структура, волокна и спайки наблюдались практически одновременно. На примере двух явлений показано, что пульсации радиоизлучения вызываются частицами, ускоренными в области магнитного пересоединения, а зебра-структура возбуждается в источнике типа магнитной ловушки для быстрых частиц. Сложное сочетание странных волокон, зебра-структуры и спайков в явлении 1 декабря 2004 г. связывается с единым источником – магнитным островом, образующимся после коронального выброса массы.

??? With the aid of all available data ground and satellite observations the reason for the appearance of different elements of the fine structure of solar radio bursts in the decimeter and microwave wave bands is explained. In some events fast pulsations, the zebra-structure, fibers and spikes were observed practically simultaneously. It is shown based on the example of two events that the pulsations of radio emission are caused by the particles, accelerated in the region of magnetic reconnection, and zebra-structure is excited in the source of the type of magnetic trap for the fast particles. Complex combination of strange fibers, zebra-structure and spikes in the event on December 1, 2004 is connected with the united source – the magnetic island, which is formed after the coronal mass ejection.

Ключевые слова: Солнце, вспышка, радиовсплеск, тонкая структура

1 Введение

В континуальном излучении солнечных всплесков IV типа от метрового до микроволнового диапазона волн обычно наблюдаются следующие элементы тонкой структуры: быстрые пульсации в широком диапазоне частот, самые быстрые всплески миллисекундной длительности (спайки), узкие дрейфующие полосы в излучении и поглощении, среди которых различают волокна (fiber bursts) с постоянным дрейфом частоты и полосы с разнообразным дрейфом – зебра-структуру (ЗС) (Чернов, 2011). По разнообразию причудливых форм полос ЗС является самым интригующим элементом тонкой структуры. Поэтому она привлекала особое внимание исследователей, и после первой публикации о наблюдениях ЗС в метровом диапазоне (Эльгарой,

Развитие вспышечных процессов...

1959) вышло более ста работ, посвященных не только новым наблюдениям ЗС, но и чисто теоретических.

За последние 40 лет было предложено более десятка механизмов излучения для ее объяснения. Самой распространенной моделью является механизм излучения в условиях двойного плазменного резонанса (Железняков и Злотник, 1975), когда верхняя гибридная частота ω_{UH} сравнивается с целым числом электронных циклотронных гармоник $\omega_{UH} = (\omega_{pe}^2 + \omega_{Be}^2)^{1/2} = s\omega_{Be}$, где ω_{pe} – плазменная частота, ω_{Be} – циклотронная частота электронов и s – номер гармоники при условии, что $\omega_{Be} \ll \omega_{pe}$.

Одним из важных альтернативных механизмов можно считать взаимодействие плазменных волн с вистлерами (Чернов, 1976): $l + w \rightarrow t$. Койперс (1975) предложил его для объяснения волокон (fiber bursts). Однако в источнике типа магнитной ловушки вистлеры, возбуждаемые на аномальном эффекте Доплера, могут формироваться в виде периодических волновых пакетов, которые, распространяясь с групповой скоростью, определяют частотный дрейф полос ЗС, меняющийся синхронно с пространственным дрейфом радиоисточника в короне. Только в модели с вистлерами удастся объяснить ряд тонких эффектов динамики полос ЗС: пилообразный частотный дрейф, частотное расщепление полос, сверхтонкую структуру полос в виде миллисекундных спайков (Чернов, 2006). Ряд других моделей ЗС (Треман и др., 2003; Леденев и др., 2006; Лаптухов, Чернов, 2006, 2012; Фомичев и др., 2009) и др. еще не получили однозначного признания. Актуальность исследований ЗС возросла после обнаружения подобных полос в радиоизлучении пульсара в Крабовидной туманности при экстремальных физических параметрах, свойственных пульсарам (Железняков и др., 2012). Во многих солнечных явлениях все отмеченные элементы тонкой структуры присутствуют практически одновременно на динамическом спектре, а их механизмы излучения могут быть разными. Часто помогает привлечение к анализу вспышки всех оптических и рентгеновских данных. Так, в явлении 11 апреля 2013 г. использование одновременных изображений в нескольких линиях крайнего ультрафиолета с КА SDO/AIA (Solar Dynamic Observatory/Atmospheric Imaging Assembly) помогло понять многократную смену знака круговой поляризации радиоизлучения, когда каждое новое вспышечное уярчение происходило над областями с разной магнитной полярностью, а мода волны оставалась обыкновенного типа (Чернов и др., 2016).

Но вот в следующем явлении, 21 июня 2013 г., наблюдалась развитая группа быстрых пульсаций также вокруг 3 ГГц, но ЗС отсутствовала. В явлении 1 декабря 2004 г., наоборот, с самого начала явления практически одновременно на спектре в дециметровом диапазоне 1.1–1.34 ГГц присутствовали разнообразные волокна, спайки, пульсации и ЗС. В данной работе делается попытка разобраться в этой иерархии тонкой структуры и связать ее с динамикой вспышечного процесса. Статистический анализ ЗС осложняется большим разнообразием явлений, о чем свидетельствует работа Тан и др. (2014). В отсутствие позиционных наблюдений радиоисточников с высоким разрешением сначала важно понять причины последовательного появления отдельных элементов тонкой структуры и еще важнее понять их одновременное появление, поскольку до настоящего времени такого анализа явлений еще не проводилось.

2 Новые наблюдения

В работе используются данные Солнечных широкополосных радиоспектрографов (SBRs) Национальной астрономической обсерватории Китая станции Хуайроу под Пекином: для явления 21 июня 2013 г. спектрограф в микроволновом диапазоне 2.6–3.8 ГГц с частотным разрешением 10 МГц и временным 8 мс; для явления 1 декабря 2004 г. спектрограф в дециметровом диапазоне 1.1–1.34 ГГц с высоким разрешением 4 МГц и 1.25 мс (Фу и др., 2004). Для анализа явлений в целом использовались все доступные спутниковые данные: SOHO/LACO C2, SOHO/MDI/EIT, RHESSI, SDO/AIA.

2.1 Явление 21 июня 2013 г.

Это явление примечательно тем, что пульсации и ЗС появлялись независимо в разные моменты времени. Вспышка балла 2.9 произошла в восточной области NOAA 11777 (S12 E75). Первые быстрые пульсации в диапазоне 2.6–3.2 ГГц появились сразу после коронального выброса массы (КВМ) в 03:01:50 UT, однако без полос ЗС с **высокочастотного** края, в отличие от упомянутого во Введении явления 11 апреля 2013 г. (рис. 1).

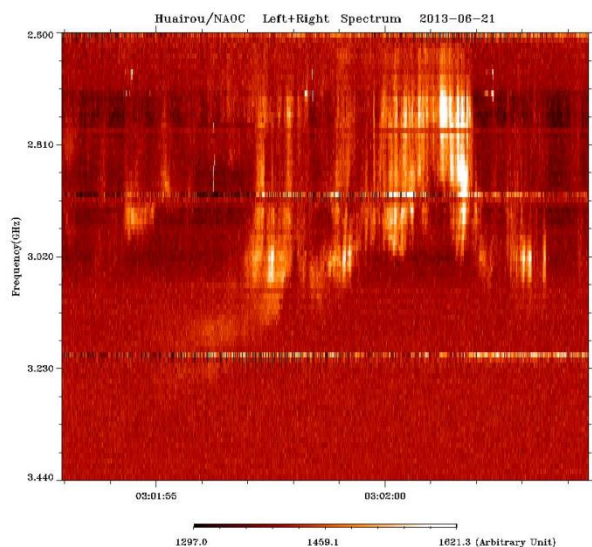


Рис. 1. Быстрые пульсации с неравномерной границей обрезания излучения с **ВЧ**-края спектра в отсутствии зебра структуры

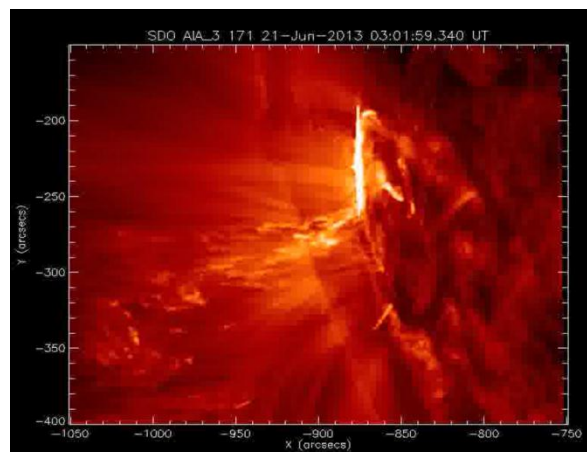


Рис. 2. SDO 171 Å на момент пульсаций. Последние следы КВМ вдоль открытых силовых линий. Уярчение вспышки свидетельствует об ускорении частиц, но нет магнитной ловушки, отсутствуют условия для генерации ЗС, поэтому наблюдаются только пульсации

Начало КВМ приходится на момент 02:45 UT, и на фильмах SDO/AIA он начинается со взрыва темного волокна. Выброс уходит высоко в корону вдоль открытых силовых линий (рис. 2) и к моменту пульсаций в 03:01:50 UT еще видны последние мелкие выбросы в хвосте КВМ. И в это же время начинается уярчение вспышки, связанное, вероятно, с магнитным пересоединением и, следовательно, с ускорением частиц, следствием которых и являются быстрые пульсации (рис. 1). Как видно на рис. 2, никаких замкнутых петель (магнитной ловушки) в это время нет, и, следовательно, отсутствуют условия для возбуждения ЗС (в рамках моделей на **ДПР** или на вистлерах).

Но вот около 03:10:00 UT появилась ЗС и точно в этот момент видно формирование вспышечной петли, вероятно, после повторного уярчения вспышки, видимого на фильме. Примерно через 3 мин вспышечная петля затухает.

Еще более интенсивная ЗС появилась только в 03:25:25 UT (рис. 3). Как раз в этот момент новое уярчение вспышки заканчивается появлением новой вспышечной петли в том же месте. Как видно на рис. 4, высота вспышечных петель соответствует микроволновому диапазону плазменной частоты.

В обоих случаях радиоизлучение ЗС имело очень слабую поляризацию, что характерно для лимбовых явлений. Кроме того, видно, что максимум энерговыделения имел место в вершинах

Развитие вспышечных процессов...

петель. Таким образом, здесь наглядно видно, что ЗС появлялась только в моменты формирования вспышечных петель, магнитных ловушек для быстрых частиц.

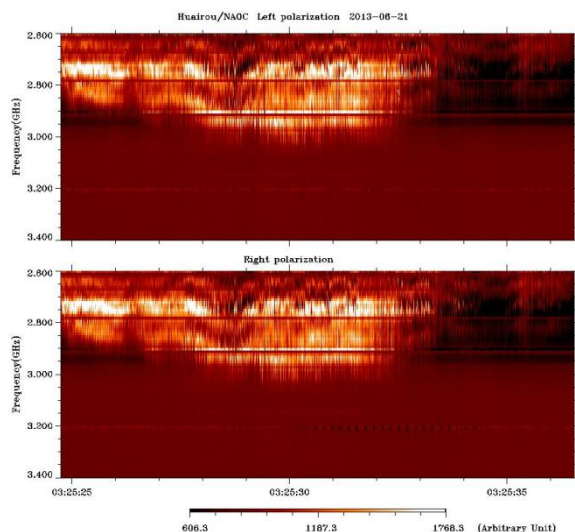


Рис. 3. Второе появление ЗС в конце явления 21 июня 2013 г.

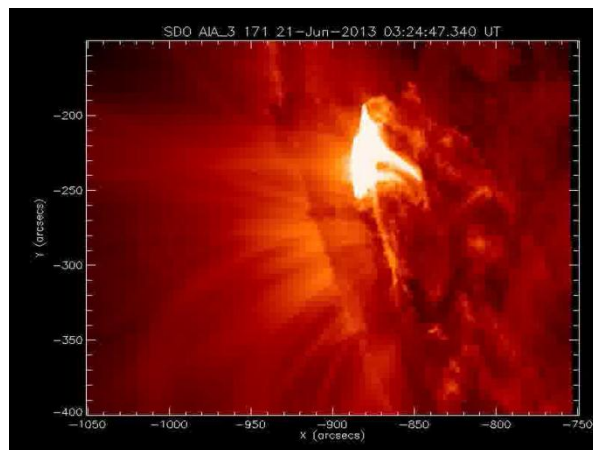


Рис. 4. SDO 171 Å. Вспышечная петля в виде магнитной ловушки появилась как раз в момент появления зебра-структуры в конце явления

2.2 Явление 1 декабря 2004 г. Наблюдения

Явление 1 декабря 2004 г. обсуждается уже более 10 лет, но каждая работа была посвящена какому-то одному выбранному эффекту. Если Хуанг и др. (2007) рассматривали явление в целом, включая анализ тонкой структуры радиоизлучения (однако только на импульсной фазе всплеска), то работы Нинг и др. (2009), Гао и др. (2014) посвящены анализу двух необычных групп волокон в начале явления (рис. 5). В первой публикации (Лю и др., 2006), где только упоминаются эти необычные группы волокон, они причислены к фантастическим образцам (fantastic pattern) тонкой структуры всплесков типа “руки с пальцами”. Зебра-структура и так называемые лейс-всплески наблюдались в течение всего явления еще более 30 минут (Хуанг и Тан, 2012).

Начало явления описано в работе Хуанг и др. (2007). Небольшая вспышка балла M1.1 произошла в активной области NOAA 10708 вблизи центра диска (N06 E20) с началом в 07:06, максимумом в 07:15 и согласно данным в рентгеновском излучении (в мягком, GOES и в жестком, RHESSI), продолжалась до 08:21 UT. Еще перед максимумом наблюдалось пять отдельных пиков. В упомянутых работах нет анализа эволюции тонкой структуры и механизмов радиоизлучения. После двух групп необычных волокон (рис. 5) наблюдались волокна, погруженные в развитую ЗС (рис. 6).

ЗС продолжалась примерно около минуты и закончилась ограничением со стороны ВЧ-волокон (рис. 7). Похожее ограничение ЗС волокнами с ВЧ-края наблюдалось позднее и в микроволновом диапазоне 2.6–3.8 ГГц в явлении 1 августа 2010 г. (Чернов и др., 2014). При этом знак круговой поляризации менялся семь раз в течение 2.5 минут (рис. 8). Такие изменения поляризации согласуются с динамикой источников в жестком рентгеновском излучении: каждое новое вспышечное уярчение совпадало с новым источником в разных энергетических

диапазонах. Первое такое уярчение над хвостовым пятном наблюдалось в 07:05:55 UT и в линии крайнего ультрафиолета 284 Å на SOHO/EIT.

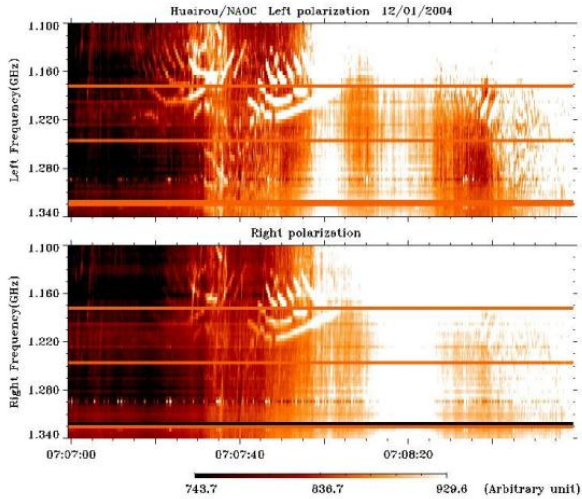


Рис. 5. Начало явления 1.12.2004 длительностью 1 мин 40 с. Умеренная левая поляризация волокон и слабая правая поляризация континуума

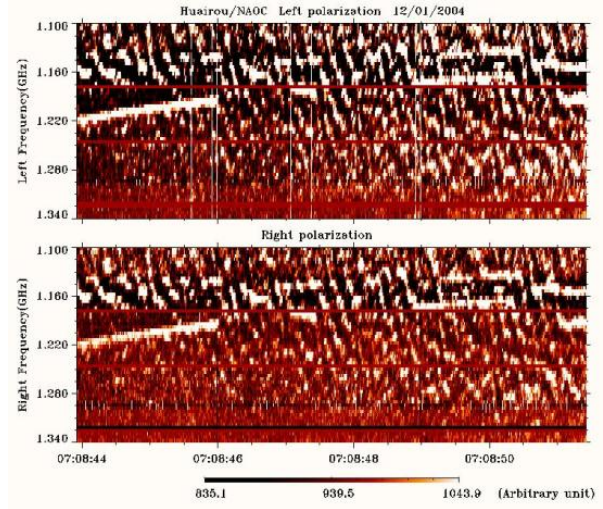


Рис. 6. Продолжение явления 1.12.2004 (длительностью 8 с) с развитой ЗС с погруженными в нее волокнами. Излучение имеет умеренную (слабую) правую поляризацию (см. ниже временные профили)

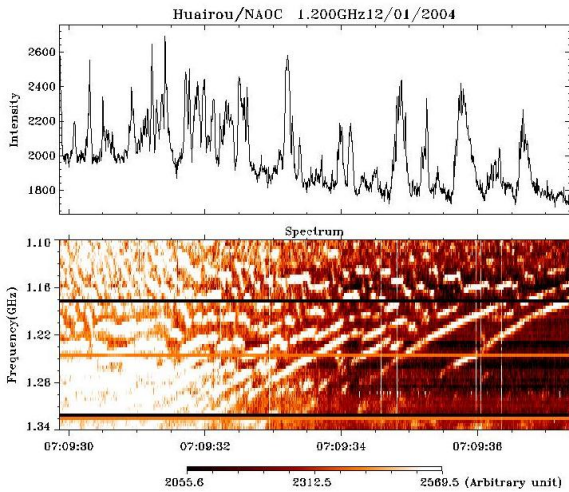


Рис. 7. Зебра-структура ограничена с ВЧ-серией волокон в явлении 1 декабря 2004 г. в диапазоне 1–1.34 ГГц. Поляризация снова поменяла знак на левый

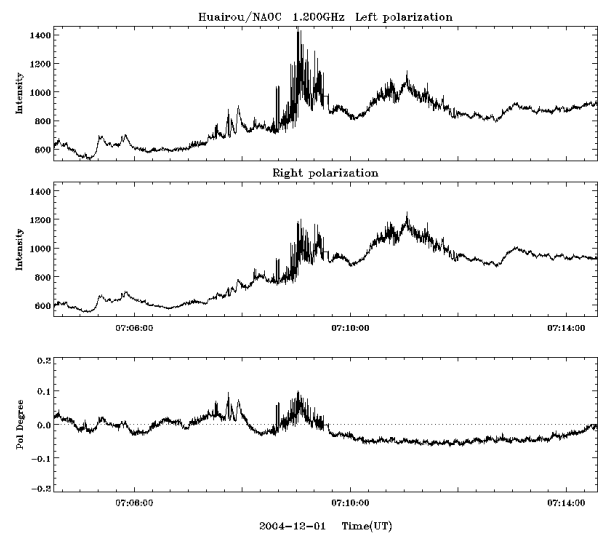


Рис. 8. Временные профили каналов в левой и правой поляризации и степени поляризации. Поляризация меняла знак 7 раз

Нинг и др. (2009) связывают излучение тонкой структуры с быстрыми частицами, ускоренными вниз из области магнитного пересоединения. Две группы волокон в начале **объясняются**

Развитие вспышечных процессов...

медленными выбросами вниз, которые и **объясняют** медленный положительный дрейф волокон. Можно только догадываться, что узкая полоса частот волокон связана с размерами этих выбросов. Зебра-структура рассматривается в рамках двух моделей, двойного плазменного резонанса и с вистлерами, причем источник предполагается фактически в том же месте вспышечных петель, где несколько секунд ранее располагались источники волокон.

Нинг и др. (2009) связывают две необычные группы волокон в начале явления с испарениями хромосферы в результате ее бомбардировки быстрыми частицами, ускоренными вниз из области магнитного пересоединения. Однако это можно считать только предположениями, поскольку отсутствует временное совпадение моментов испарения (по данным жесткого рентгена) с моментами появления волокон. Кроме того, отсутствует объяснение узкой полосы частот волокон, их частотного дрейфа и периодичности.

Отметим, что наиболее реальное объяснение необычных волокон в начале явления предложено в Гао и др. (2014). Излучение волокон связывается с выбросами магнитных островов (облаков) из области магнитного пересоединения и подъема вспышечных петель. Однако отсутствует анализ механизма генерации волокон, указывается только на возможную роль конечной ударной волны (termination shock), за фронтом которой должно происходить ускорение частиц.

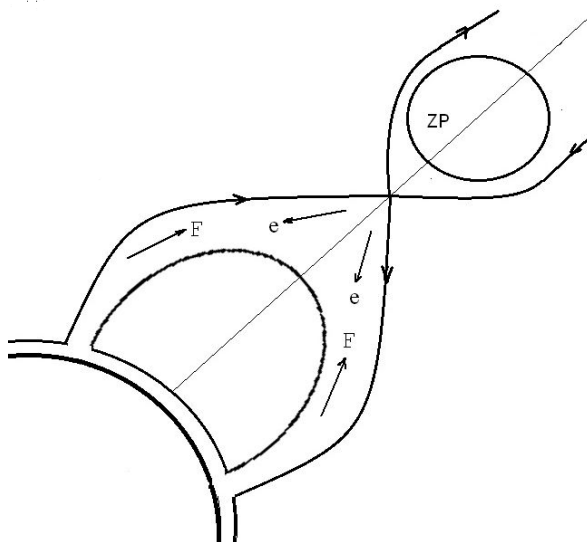


Рис. 9. Схема вспышки для явления 1.12.2004. Это длительное явление, над вспышечной петлей образуются магнитные острова. Схема относится к моменту после взаимодействия острова со вспышечной петлей с образованием X-точки магнитного пересоединения и ускорения частиц в обе стороны из токового слоя

2.3 Интерпретация явления 1 декабря 2004 г.

Начало KBM 1.12.2004 проектируется (аппроксимируется) на 07:00, это начало вспышки в мягком рентгене GOES. Поэтому KBM был вызван начальным взрывом волокна. Однако всплеска II типа не было, спектрограф HIRAIISO дает только всплеск IV типа. Источник HXR 5–6 кэВ в начале был одиночный над головным пятном, а к 07:05 UT стал двойным (в основаниях петель). Это эффект быстрых частиц, достигших плотной плазмы в основаниях петель, который использовался в работе Нинг и др. (2010) в качестве доказательства хромосферных испарений. После ухода KBM эти частицы могли ускориться в ходе длительного магнитного пересоединения с образованием магнитного острова. Вероятно, магнитный остров уже существовал к мо-

менту 07:07:30 UT и его размеры определяли частотный диапазон двух групп необычных волокон. Поэтому мы предлагаем новую схему вспышки с магнитным островом (рис. 9). Частицы ускоряются в токовом слое внизу магнитного острова, причем не только вниз, но и вверх. С начала ускорения частиц (когда еще не было континуума) частицы, ускоренные вверх, должны возбуждать плазменные волны и вистлеры. Вистлеры, возбуждаемые на нормальном эффекте Доплера, должны распространяться вниз. Таким образом, необычные группы волокон с положительным частотным дрейфом, это волокна (fiber bursts), возбуждаемые волновыми пакетами вистлеров, захваченных в магнитное облако. Они не могут распространяться ниже точки пересоединения. Замедление частотного дрейфа вызывается именно этим захватом.

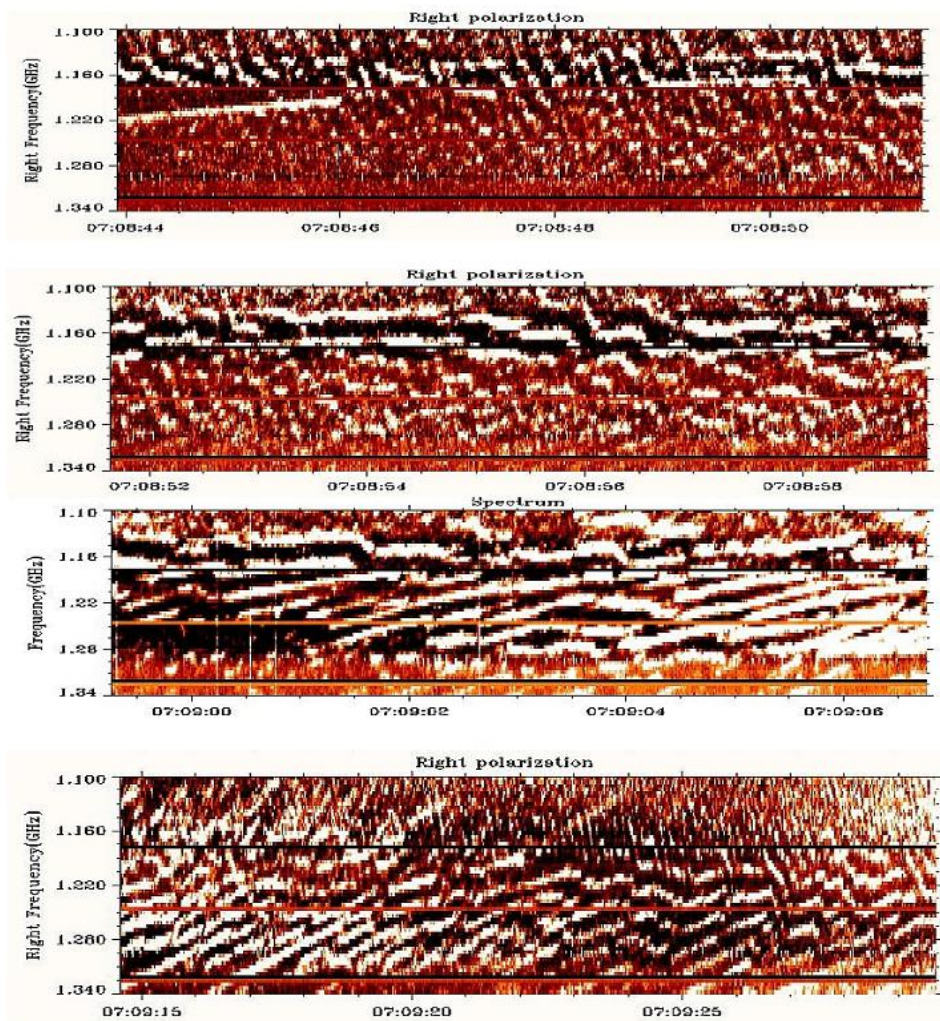


Рис. 10. Постепенный переход волокон в зебру и ее эволюция в течение 46 с

Частицы, ускоренные вниз, возбуждают вистлеры, распространяющиеся вверх. Они вызывают волокна с отрицательным частотным дрейфом. Поэтому на спектре они выглядят как высокочастотная граница групп волокон с положительным дрейфом. При этом облако могло сначала опускаться вниз, встречая замкнутую вспыхивающую петлю. Очевидные выбросы плазмы вниз из токового слоя должны вызывать ударную волну, встречающую преграду в виде вспыхивающей петли. Поэтому ударная волна неизбежно должна стать конечной (termination shock

Развитие вспышечных процессов...

(TS)), в которой происходит дополнительное активное ускорение частиц, и о которой говорится в работе Гао и др. (2014). В этой работе авторы сомневаются только, что не имеют других доказательств существования конечной ударной волны. Однако в недавней работе Чен и др. (2016) приведены такие доказательства для другого явления.

Первым эффектом частиц, ускоренных во фронте TS, являются быстрые всплески типа **спайк** как первичное энерговыделение (Чен и др., 2016). Часть частиц захватывается в магнитное облако, где формируется распределение по скоростям с конусом потерь (или кольцевое распределение), с которыми связывается излучение зебра-структуры.

В первые секунды частицы (до захвата) должны вызывать эпизодические волокна, погруженные в развитую зебра-структуру.

Все перечисленные эффекты от частиц, ускоренных во фронте TS, можно проследить на рис. 10. Волокно в начале верхнего спектра фактически выглядит продолжением волокон с отрицательным частотным дрейфом, ограничивающих со стороны высоких частот две группы необычных волокон в начале явления. Но оно уже погружается в семейство спайков и **постепенно** делится на несколько волокон, переходящих **постепенно** в несколько полос ЗС с волнообразным дрейфом. Частицы и вистлеры **постепенно** заполняют все магнитное облако, и на третьей вкладке спектра мы наблюдаем расширение полосы частот ЗС почти на весь диапазон, лишь частично окруженную спайками. На нижней вкладке ЗС перемешивается со спайками (или спайки организуются в полосы ЗС, которые частично выглядят как волокна с отрицательным дрейфом). Все эти процессы происходят в довольно узкой полосе частот 1.1–1.34 ГГц, в источнике типа магнитного острова.

Поляризация континуума в течение первых 10 мин всплеска меняла знак семь раз (рис. 8).

Даже беглого взгляда на изображения источников жесткого рентгена достаточно, чтобы понять эффект преобладания то северного источника (с левым знаком поляризации), то южного (с правым знаком). Источник HXR 25–30 кэВ возник в стороне, в южной части АО 10708. После примерно 07:11 UT вообще несколько минут оставался один южный источник, и поляризация в это время оставалась правого знака. Согласно магнитограммам АО MDI (рис. 6 в Нинг и др., 2009), радиоизлучение всегда соответствовало обыкновенной моде.

Далее до 07:17 UT появлялись эпизодические разорванные волокна на фоне континуума, состоящего из спайков с длительностью на грани разрешения инструмента 1.25 мс.

То есть ускорение во фронте TS продолжалось, трудно сказать насколько турбулентность плазмы внутри магнитного острова нарастала или, наоборот, убывала. Но волокна и облака спайков **свидетельствует** о наличии вистлеров и ионно-звуковых волн. Возможно, что здесь не произошло быстрого разрыва TS, как в явлении 3 марта 2012 г. (Чен и др., 2015). Скорее всего, фронт TS вместе с вершиной вспышечной петли испытывали медленные смещения (колебания) вверх и вниз, а частицы и волны продолжали захватываться в магнитный остров. Постепенная эволюция тонкой структуры (начальные странные волокна в ЗС, спайки, новые волокна и всплески типа **кружево**) связана с эволюцией функции распределения быстрых частиц внутри магнитного острова.

Тонкая структура на затухающей фазе всплеска анализировалась в работе Хуанг и Тан (2012), в том числе особое внимание уделено так называемым всплескам типа **кружево** (lace bursts), которые появились к моменту 07:25 UT и продолжались до 07:33:30 UT.

Кружевные всплески интерпретировались в работе Карлицкий и др. (2001) излучением из турбулентной плазмы в условиях двойного плазменного резонанса, когда параметры магнитного поля и плотности резко меняются, часто нарушая условие ДПР. Резких колебаний магнитного поля и плотности на затухающей фазе вспышки ожидать трудно. И Хуанг и Тан (2012) связывают кружевные всплески с излучением мод Бернштейна, хотя оснований для этого мало как по хаотичной форме полос, так и из-за сильной поляризации всплесков. Однако оценки напря-

женности магнитного поля по модам Бернштейна совпали со значениями, полученными по волокнам (fiber bursts) и по ЗС, около 70 Г.

В данном явлении более очевидным было связать кружевные всплески с волновыми пакетами вистлеров, захваченных в магнитный остров, поскольку на протяжении всего явления волокна, переходящие в полосы ЗС и обратно, явно связаны с вистлерами.

3 Заключение

В отсутствие позиционных наблюдений радиоисточников с высоким разрешением мы пытались понять причины последовательного появления отдельных элементов тонкой структуры и объяснить их одновременное появление в дециметровом и микроволновом диапазонах волн, поскольку до настоящего времени такого анализа явлений еще не проводилось. Использовались все доступные данные наземных и спутниковых наблюдений. На примере двух явлений показано, что пульсации радиоизлучения вызываются частицами, ускоренными в области магнитного пересоединения, а зебра-структура возбуждается в источнике типа магнитной ловушки для быстрых частиц. Сложное сочетание странных волокон, зебра-структуры и спайков в явлении 1 декабря 2004 г. связывается с развитием неустойчивостей в одном источнике – магнитном острове, образующимся после коронального выброса массы.

Благодарности. Авторы благодарны командам SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), RHESSI, SDO и эксперимента STEREO за открытый доступ к базам данных. Работа поддержана грантом РФФИ 14-02-00367. Авторы признательны китайским коллегам за спектральные наблюдения и Роберту Сычу за помощь в подготовке фильмов SDO и их обсуждение.

Литература

- Гао и др. (Gao G.-N., Wang M., Lin J., Wu N., Tan C.M., Kliem B., and Su Y.) // Res. Astron. Astrophys. 2014. V. 14. N. 7. P. 843.
- Железняков и Злотник (Zheleznyakov V.V. and Zlotnik E.Ya.) // Solar Phys. 1975. V. 44. P. 461.
- Железняков В.В., Зайцев В.В., Злотник Е.Я. // Письма в Астрон. журн. 2012. Т. 38. N. 9. С. 660.
- Карлицкий и др. (Karlicky M., Barta M., Jircka K., et al.) // Astron. Astrophys. 2001. V. 375. P. 638.
- Койперс (Kuijpers J.) // Collective wave particle interaction in solar type IV radio sources. PHD Thesis of Utrecht Observ. Utrecht. 1975.
- Лаптухов А.И., Чернов Г.П. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 10. С. 939.
- Лаптухов А.И., Чернов Г.П. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 6. С. 1.**
- Леденев и др. (Ledenev V.G., Yan Y., and Fu Q.) // Solar Phys. 2006. V. 233. P. 129.
- Лю и др. (Liu Y.Y., Fu Q.J., Yan Y.H., Tan Ch.M.) // Publ. Nat. Astron. Obs. China. 2006. V. 3. P. 119.
- ЛяБэль и др. (LaBelle J., Treumann R.A., Yoon P.H., Karlicky M.) // Astrophys. J. 2003. V. 593. P. 1195.**
- Нинг и др. (Ning Z., Cao W., Huang J., Huang G., Yan Y., and Feng H.) // Astrophys. J. 2009. V. 699. P. 15.
- Тан и др. (Tan B.L., Tan Ch. M., Zhang Y., Mészárosová H., Karlický M.) // Astrophys. J. 2014. V. 780. P. 129.
- Хуанг и Тан (Huang J. and Tan B.L.) // Astrophys. J. 2012. V. 745. P. 186.
- Хуанг и др. (Huang J., Yan Y., Liu Y.) // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 1441.
- Фомичев В.В., Файнштейн С.М., Чернов Г.П. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 12. С. 1114.
- Фу и др. (Fu Q.J., Ji H.R., Qin Z.H.) // Solar Phys. 2004. V. 222. P. 167.
- Чен и др. (Chen B., Bastian T.S., Shen Ch., Gary D.E., Krucker S.) // Science AAAS. 2015. V. 350. Issue 6265. P. 1248. (P. 28 with supplement material).

Развитие вспышечных процессов...

Чернов Г.П. // Астрон. журн. 1976. Т. 53. № 5. С. 1027.

Чернов (Chernov G.P.) // Space Sci. Rev. 2006. V. 127. С. 195.

Чернов (Chernov G.P.) // Fine Structure of Solar Radio Bursts. Springer Astrophys. And Space Science Library. 375. 2011.

Чернов и др. (Chernov G.P., Yan Y.H, Fu Q.J.) // Res. Astron. Astrophys. 2014. V. 14. N. 7. P. 83.

Чернов и др. (Chernov G.P., Sych R., Tan B, Yan Y., Tan Ch., Fu Q., Karlicky M., and Fomichev V.V.) // Res. Astron. Astrophys. 2016. 16. № 2. P. 28.