

УДК 523.985

## СОЛНЕЧНЫЕ РАДИОВСПЛЕСКИ, СВЯЗАННЫЕ СО СТОЯЧИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

© 2020 г. В. В. Фомичев<sup>1</sup>, Г. П. Чернов<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: gchernov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 23.04.2019 г.

После доработки 25.06.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Рассмотрен ряд явлений с радиовсплесками в дециметровом и сантиметровом диапазонах, похожих на всплески II типа в метровом диапазоне. Во всех явлениях радиовсплески обнаруживали остановку частотного дрейфа и его смену на обратный. Анализ всех имеющихся у нас данных о соответствующих вспышках свидетельствует о возникновении конечных ударных волн (termination shock), во фронтах которых происходило ускорение частиц. Это подтверждается рождением новых источников жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения быстрых всплесков (спайков), волокон и зебра-структуры. Источники дрейфующих полос с разворотом дрейфа располагались или между вспышечной петлей и нижней ударной волной, или между нижней и верхней ударными волнами. Оценки критического числа Маха для обычных параметров вспышечной плазмы показали, что значения ( $M_{кр} = 1.1–1.3$ ) могут легко реализоваться в рассматриваемых явлениях, и излучение можно связать с бунемановской неустойчивостью. Реализация необходимых условий для генерации наблюдаемых всплесков электромагнитного излучения возможна в шлемовидных магнитных структурах в солнечной короне.

DOI: 10.31857/S0016794020020054

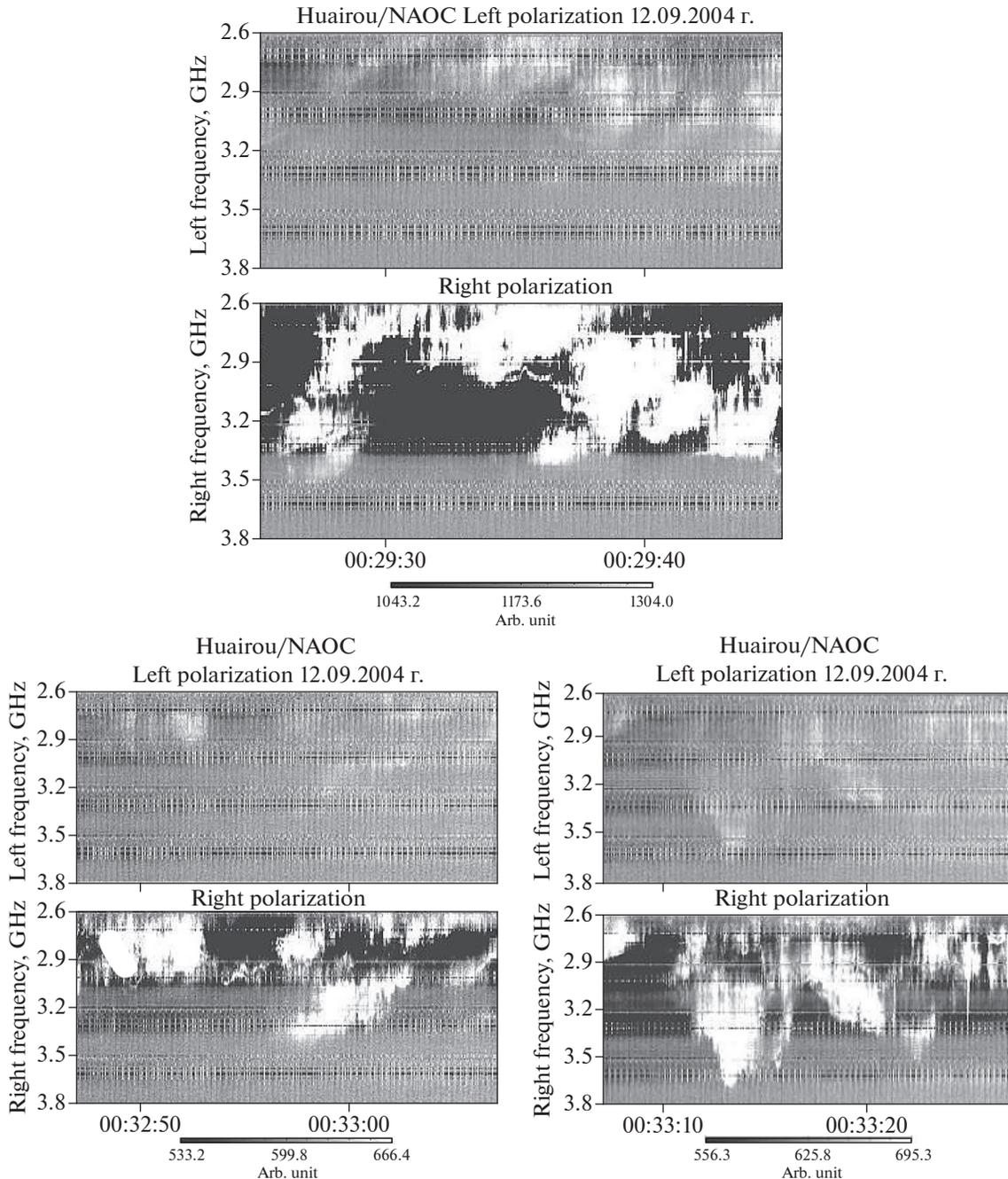
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Существующая в настоящее время классификация солнечных радиовсплесков основана на особенностях их динамических спектров, в основном, в метровом и дециметровом диапазонах длин волн [Железняков, 1964; Kundu, 1965]. Однако на динамических спектрах солнечных радиовсплесков в более широком диапазоне частот иногда наблюдаются необычные всплески, которые трудно отнести к известным классическим пяти видам (I–V), и которые трудно отнести к элементам тонкой структуры, часто сопровождающим такие всплески [Chernov, 2011]. К ним можно отнести, например, дрейфующие полосы в микроволновом диапазоне, похожие на всплески II типа на метровых волнах, хотя самые высокие (начальные) частоты всплесков II типа не достигают даже дециметрового диапазона. Следует также отметить работу [Markeev et al., 1983], в которой обсуждались U-образные всплески II типа 28 марта 1980 г. с остановкой частотного дрейфа в метровом диапазоне. В этой работе авторы связывали особенности динамического спектра (и в частности, остановку частотного дрейфа) с захватом ударного фронта глобальной петлей высоко в короне. Возможность рефракции и канализиро-

ванного распространения ударных волн обсуждалась еще в обзоре [Wild and Smerd, 1972].

В ряде работ уже обсуждались всплески II типа с остановкой частотного дрейфа, источники которых гипотетически связывались с появлением стоячих ударных волн (termination shock, далее TS) [Mann et al., 2006, 2009; Warmuth et al., 2009]. Однако доказательство связи радиоисточников с TS было установлено только в работе [Chen et al., 2015], где представлены пространственные наблюдения радиоисточников с помощью Very Large Array (VLA). Изображения VLA в диапазоне 1–1.8 ГГц показали радиоисточники быстрых всплесков, пространственно совпадающие с источником жесткого рентгена на вершине петли. Первым эффектом частиц, ускоренных во фронте TS, являются быстрые всплески типа спайк. Они показали также, что разрыв TS совпадал с резким исчезновением радиовсплесков. Авторы [Warmuth et al., 2009] полагают, что основным источником ускорения частиц в явлениях подобного типа являются TS (в результате механизма дрейфового ускорения в ударном фронте).

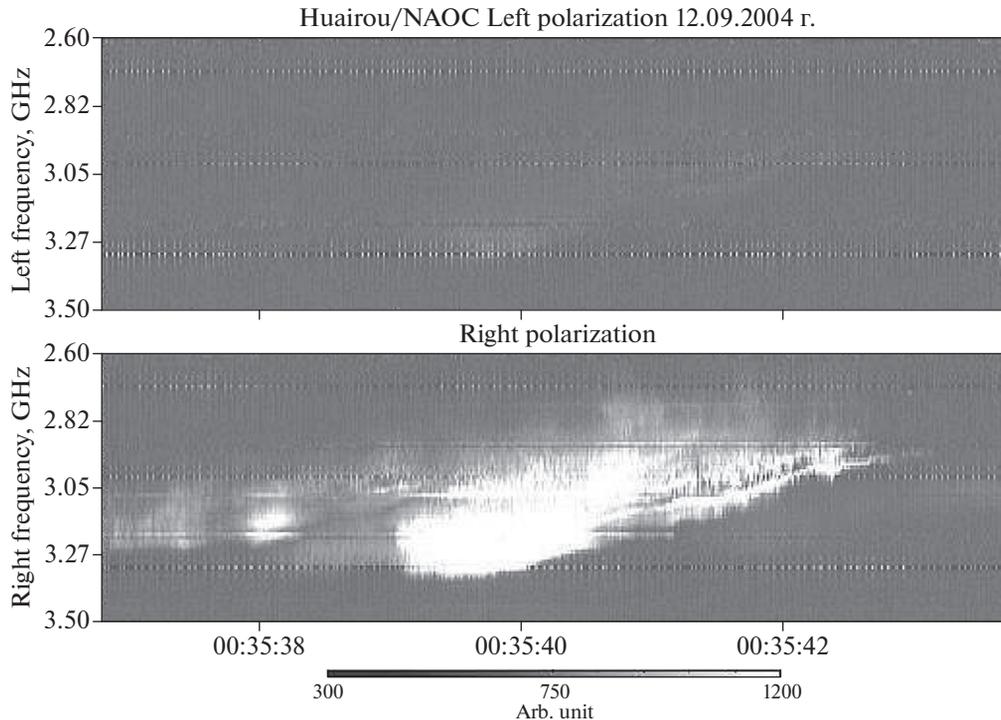
Согласно отмеченным работам основными признаками наличия TS являются данные о динамическом спектре радиовсплеска, в частности,



**Рис. 1.** Динамический спектр спектрографа ст. Huairou Национальной обсерватории Китая с временным разрешением 10 мс [Fu et al., 2004] в левой и правой поляризации в микроволновом диапазоне 2.6–3.8 ГГц. Три момента явления 12 сентября 2004 г. с разворотом дрейфа всплесков на частотах ~2.6 ГГц.

остановка дрейфа всплеска II типа (в микроволновом диапазоне он может отсутствовать), многочисленные спайк-всплески и появление новых источников жесткого рентгена, пространственно совпадающих с радиоисточниками. Данные по снимкам в крайнем ультрафиолете и в рентгене зависят существенно от температуры в источнике, которая может быть в области вспышки >20 МК.

Схема формирования TS согласуется со стандартной моделью солнечной вспышки с магнитным перезамыканием (рис. 1 в работе [Mann et al., 2009]). В данной работе мы используем эти относительно новые данные для анализа необычных радиовсплесков, обнаруживающих явное замедление частотного дрейфа, наличие тонкой структуры и совпадающие по времени источники жесткого рентгеновского излучения (HXR).



**Рис. 2.** Продолжение явления 12 сентября 2004 г. с остановкой дрейфа всплеска на частотах  $\sim 2800$  МГц.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

### 2.1. Явление 12 сентября 2004 г.

Динамический спектр этого явления в диапазоне частот 2.6–3.8 ГГц показан на рис. 1. В целом, явление представляет сложную волнообразную структуру, состоящую из многих отдельных клочков (длительностью до 10 с и перекрывающих полосу частот  $\sim 0.1$  от центральной частоты) со своей внутренней тонкой структурой (кратковременных всплесков длительностью  $\sim 0.1$  с). Замедление и смена знака дрейфа в этой волнообразной структуре происходит на частотах  $\sim 2.5$  ГГц. Через 2.5 мин наблюдаем почти повторение этого эффекта, а через 5 мин появилась новая полоса с остановкой дрейфа на более высоких частотах  $\sim 2820$  МГц (рис. 2). Дрейфующие волокна в конце этого всплеска можно принять за известное расщепление полос всплеска II типа. Следует отметить, что излучение всех всплесков было сильно поляризовано. По поляризационным характеристикам и параметрам динамического спектра данное явление обнаруживает сходство с цепочками всплесков I типа в составе шумовых бурь в метровом диапазоне длин волн.

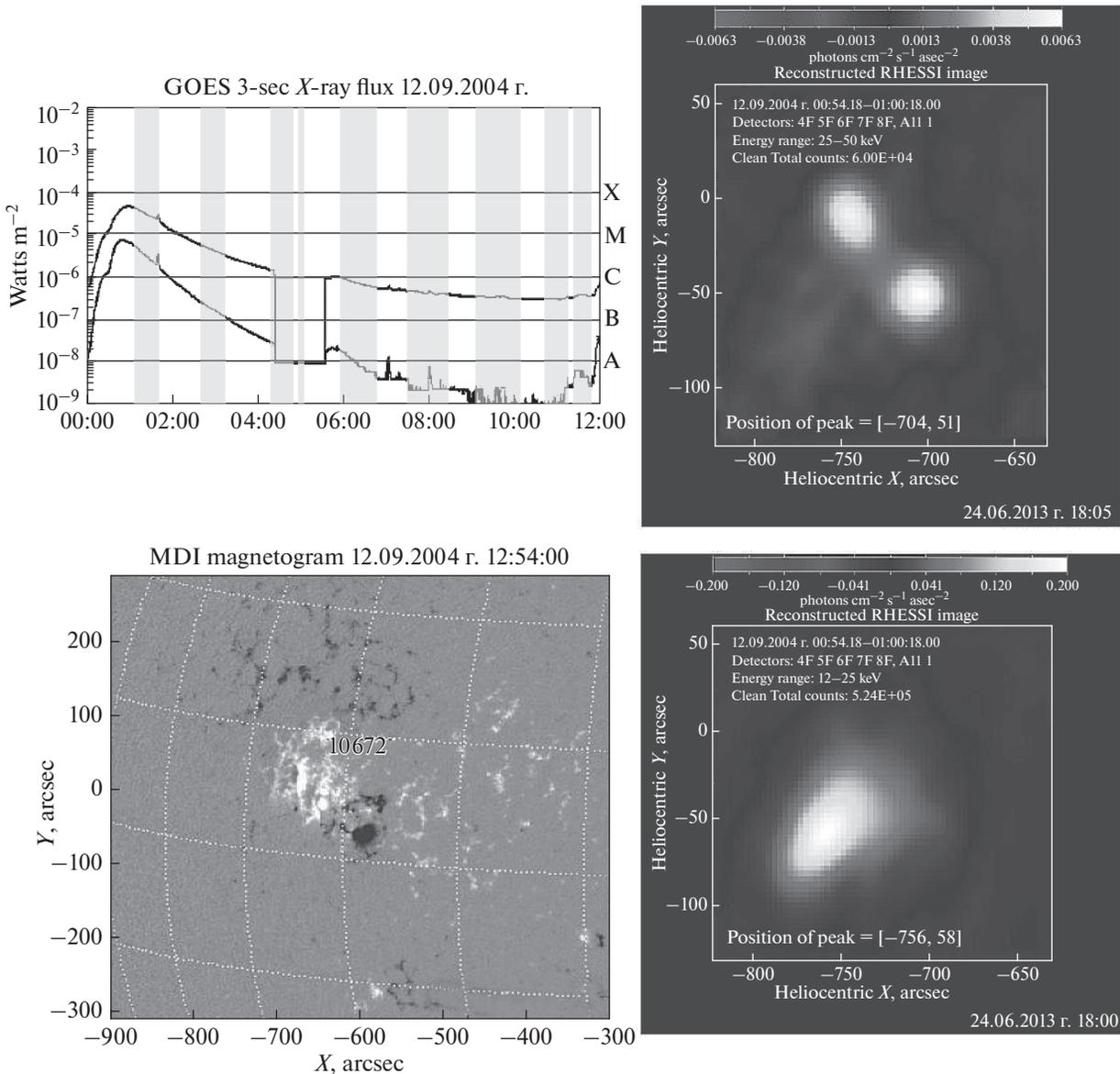
Судя по первому спектру на рис. 1, остановка и разворот частотного дрейфа произошел около момента 00:30 UT вблизи максимума всплеска в мягком рентгене (по данным ИСЗ GOES, левый верхний кадр на рис. 3). К этому моменту источники жесткого рентгеновского излучения в энер-

гичном диапазоне 25–50 кэВ (данные космического аппарата КА RHESSI) располагались в основаниях петли над основными пятнами АО 10672, а в менее энергичном диапазоне 12–25 кэВ — на вершине петли (см. соответствующие кадры на рис. 3).

### 2.2. Явление 11 апреля 2004 г.

Данное явление наблюдалось после умеренной вспышки балла C 9.6 в АО 10588 (S16 W46) 11 апреля 2004 г. В интервале 03:54–04:35 UT наблюдалась серия сложных радиовсплесков в дециметровом диапазоне, похожих по динамическим спектрам на всплески II типа и обнаруживающих остановку частотного дрейфа с последующим обратным дрейфом (рис. 4). Начало мощного коронального выброса массы (КВМ) совпадало с максимумом вспышки. Время этих радиовсплесков (04:07–04:13 UT) приходится на момент нарастания мягкого рентгеновского излучения вблизи максимума (рис. 5). Источники жесткого рентгена ложатся на основания соответствующих петель, что согласуется со стандартной моделью вспышки с магнитным пересоединением.

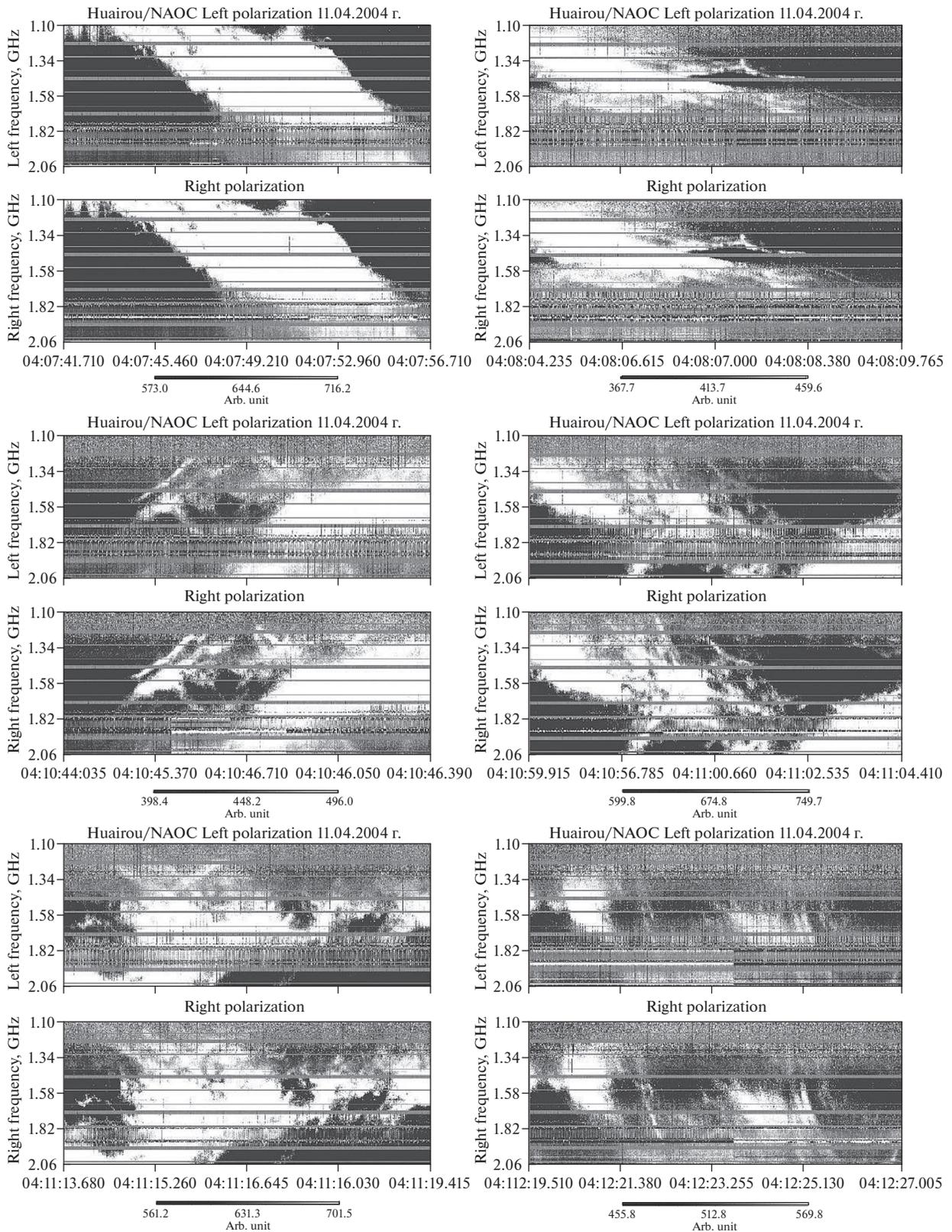
Первый всплеск на рис. 4 в 04:07 UT в виде широкой полосы дрейфует к высоким частотам, не обнаруживая остановки дрейфа вплоть до границы спектра 2.06 ГГц. Последующий аналогичный всплеск уже имеет ограничение дрейфа на



**Рис. 3.** MDI-магнитограмма АО 10672, профили GOES и источники НХР RHESSI явления 12 сентября 2004 г. Источники жесткого рентгеновского излучения 25–50 кэВ располагались в основаниях петли над основными пятнами АО 10672, а в менее энергичном диапазоне 12–25 кэВ – на вершине петли.

частоте  $\sim 1.7$  ГГц. На рисунке 4 во втором всплеске, начавшемся в 04:10:45 UT, видим остановку дрейфа и последующее отражение структурных полос на положительный дрейф. Заметим, что начальные частоты этого всплеска (имеющего волокнистую и клочковатую структуру) приходятся как раз на границу остановки дрейфа предыдущего всплеска 1.7 ГГц. Похоже, что ускорение (выброс) произошло в первой нижней TS. Однако через 1 с последующий всплеск (с характерным более континуальным излучением) имел начальные частоты  $> 2$  ГГц, не обнаруживая влияния этой нижней TS.

Начало нижнего всплеска на рис. 4 можно заметить еще на предыдущем спектре в 04:11:02 UT, возможно, даже после его отражения от нижней TS. Последний всплеск имеет еще более сложную клочковатую структуру с пересекающимися волокнами с низкочастотного края спектра. Заметно усложнилось поведение поляризации: пересекающиеся волокна преобладают в левом канале поляризации, а клочковатая структура – в правом. И очевидная остановка дрейфа видна после 04:11:18 UT на частотах  $\sim 1.3$  ГГц. Примечательно, что последующие всплески с положительным дрейфом в 04:12:19 и 04:12:23 UT имели начальные частоты именно на этой границе 1.3 ГГц.



**Рис. 4.** Динамические спектры ст. Huairou Национальной обсерватории Китая в левом и правом каналах поляризации явления 11 апреля 2004 г. Радиовсплески, похожие на всплески II типа в дециметровом диапазоне 1–2 ГГц, обнаруживают смену знака частотного дрейфа на частотах  $\sim 1$  ГГц.

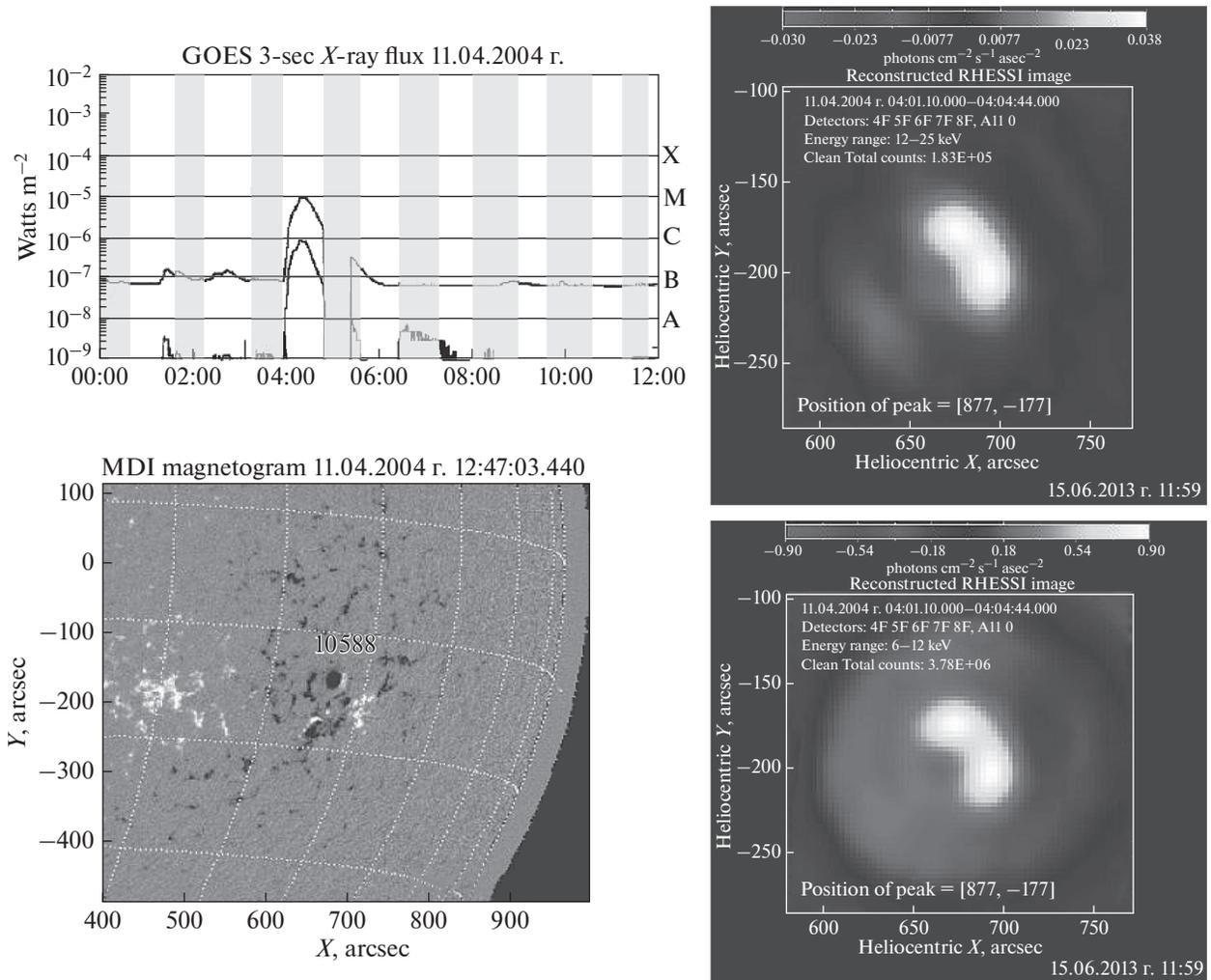


Рис. 5. MDI-магнитограмма АО 10588, профили GOES и источники HXR RHESSI явления 11 апреля 2004 г. Источники жесткого рентгеновского излучения 9–25 кэВ располагались в основаниях петли над основными пятнами.

### 2.3. Явление 18 ноября 2003 г.

После серии вспышек в АО 10501 в центре диска интересные радиовсплески наблюдались после вспышки балла M3.9 (08:12–08:31–08:59 UT), показанные на рис. 6. Вид всплеска в микроволновом диапазоне похож на всплеск II типа в метровом диапазоне.

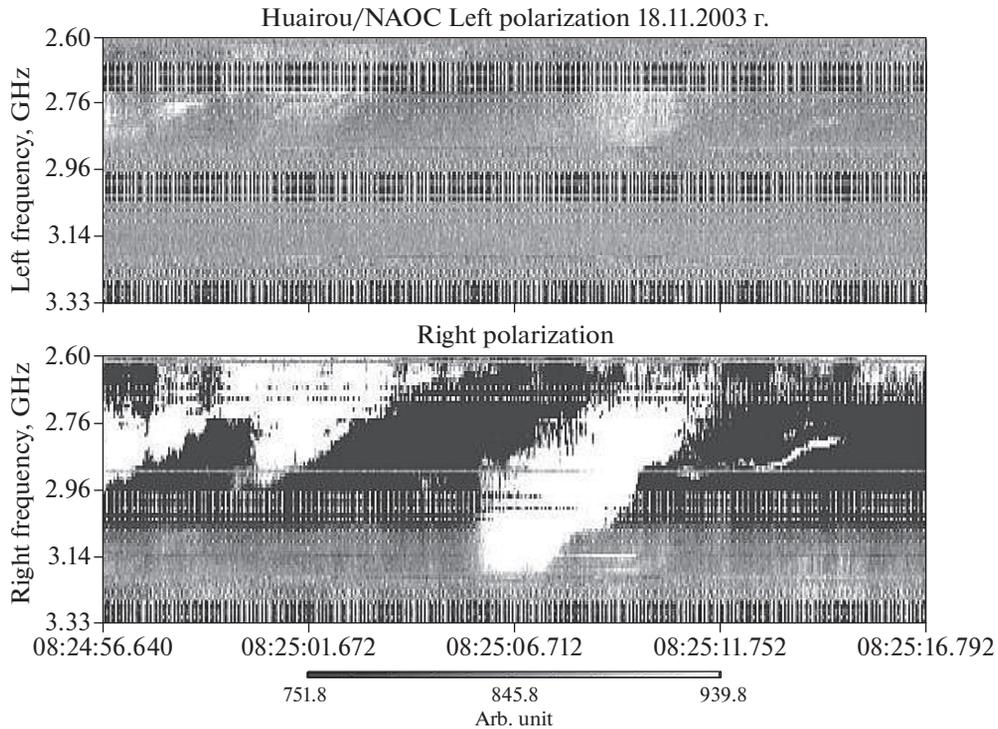
Спектр обс. Nuairou хорошо дополняется спектром обс. Ondřejov (Ондржейов) (рис. 7). Наглядно видим дрейф всех полос к низким частотам, его остановку на частотах 2.5 ГГц и даже разворот на положительный дрейф, вероятно связанный с образованием верхней конечной ударной волны. Все дрейфующие полосы составляют зebra-структуру радиоизлучения.

Появление новых источников жесткого рентгеновского излучения (см. рис. 8 и подпись к нему) свидетельствует о новых ускорениях частиц, и

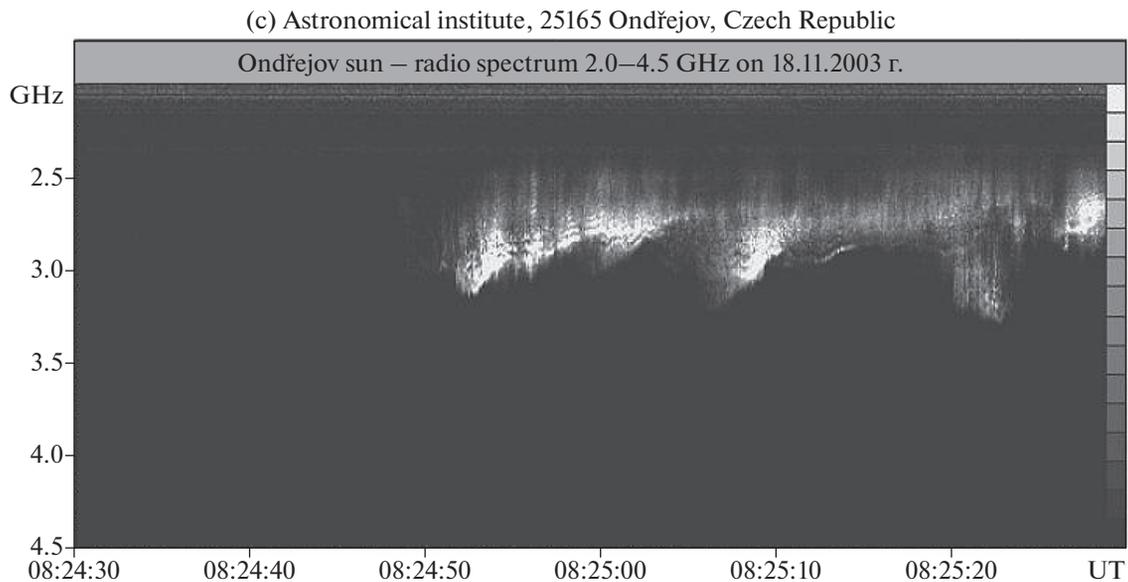
с этим связано появление зebra-структуры в дрейфующем континууме как с прямым, так и с обратным дрейфом.

### 2.4. Явление 11 сентября 2002 г.

После вспышки класса M2.2 в АО 10105 наблюдался КВМ в южном направлении (каталог SOHO, [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make\\_javamovie.php?](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?)). Максимум частотного спектра радиовсплеска был в микроволновом диапазоне: 470 сеп на 8800 МГц ([https://www.solarmonitor.org/data/2002/09/11/meta/noaa\\_events\\_raw\\_20020911.txt](https://www.solarmonitor.org/data/2002/09/11/meta/noaa_events_raw_20020911.txt)). Спектры в дециметровом диапазоне (рис. 9 и рис. 10) показывают, что с начала явления существовали две системы вспышечных петель: всплески, дрейфующие через весь диапазон 1–2 ГГц явно связаны с большими петлями между основными пятнами сопряженной полярности, а всплески, об-



**Рис. 6.** Динамический спектр спектрографа ст. Huairou Национальной обсерватории Китая в левой и правой поляризации в микроволновом диапазоне 2.6–3.8 ГГц.

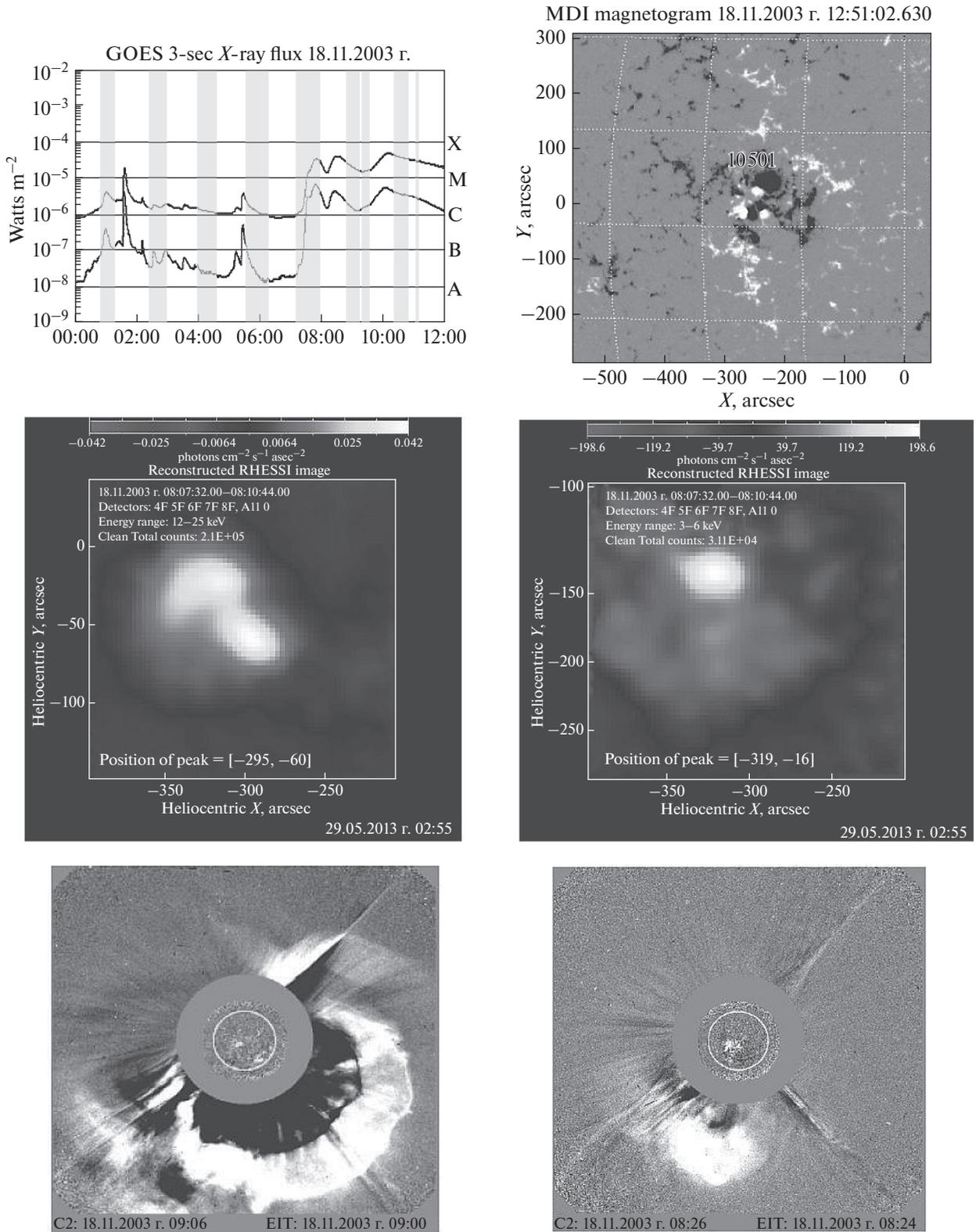


**Рис. 7.** Спектр по данным обс. Ondřejov в диапазоне 2–4.5 ГГц. Временное разрешение 10 мс [Jiřička et al., 2001].

наруживающие остановку частотного дрейфа около частоты 1.56 ГГц (рис. 11), вероятно, связаны с соседними мелкими петлями. Обе системы петель существовали независимо в течение нескольких минут. Максимум GOES X-rays совпадал с максимумом вспышки в 07:31 UT (рис. 12).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные в предыдущем разделе примеры сложной картины электромагнитного излучения в широком диапазоне (рентген, необычные радиовсплески с динамическими спектрами, подобными всплескам II типа или цепочкам всплес-



**Рис. 8.** Отражение дрейфующего континуума совпадает с максимумом мягкого рентгена в 08:25 UT (левый верхний кадр GOES). Источник жесткого рентгена в 08:10 UT располагается на вершине вспянутой петли (начало разогрева). В дальнейшем в 08:14 UT источники более энергичного канала RHESSI 12–25 кэВ располагаются в основаниях петель, если сопоставлять с MDI-магнитограммой.

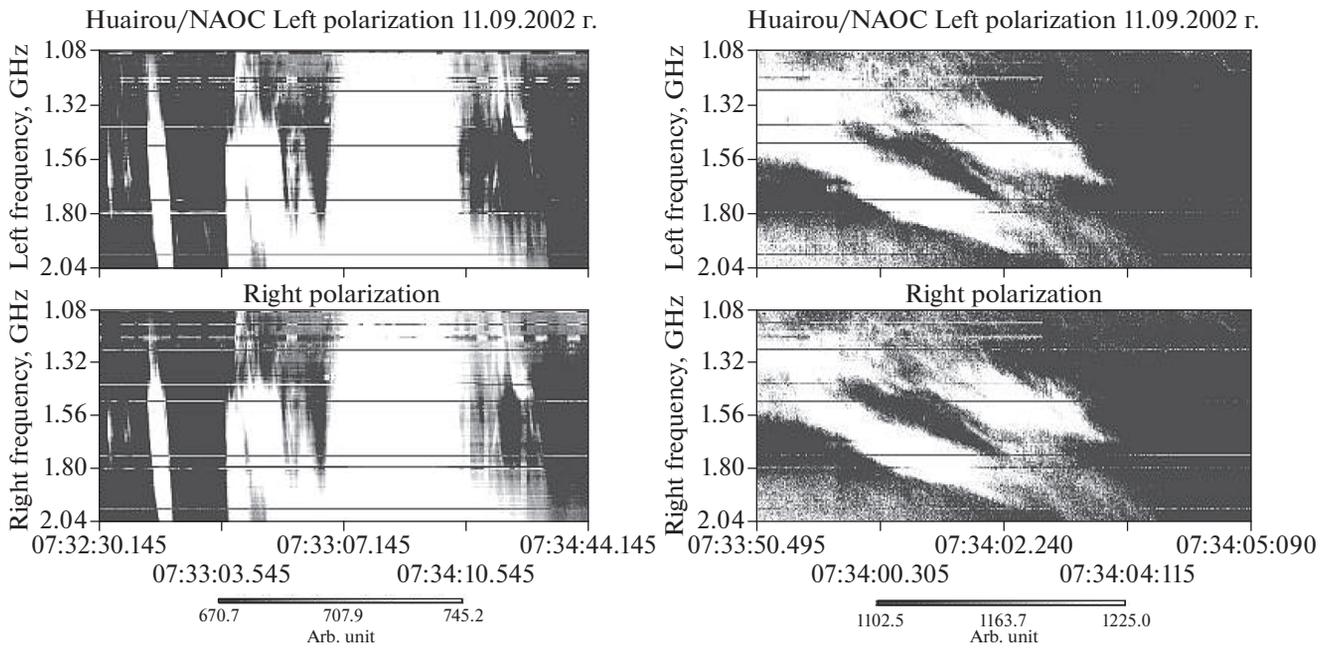


Рис. 9. Начало явления в крупном масштабе и увеличенный фрагмент всплесков, дрейфующих через весь диапазон.

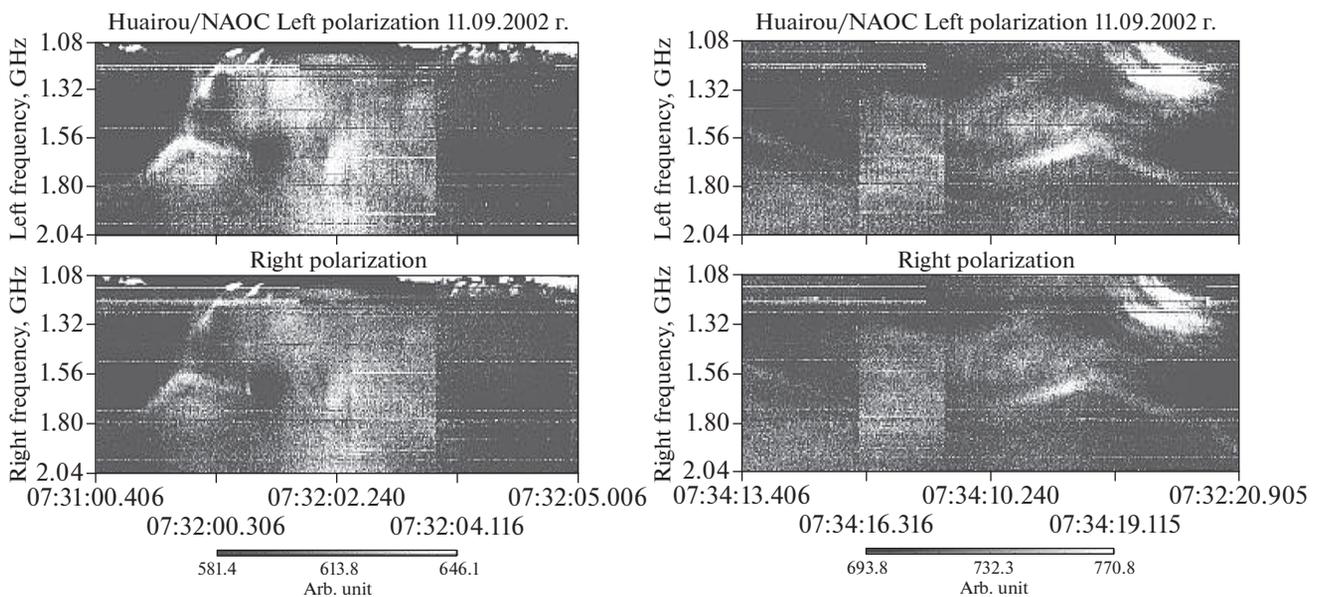
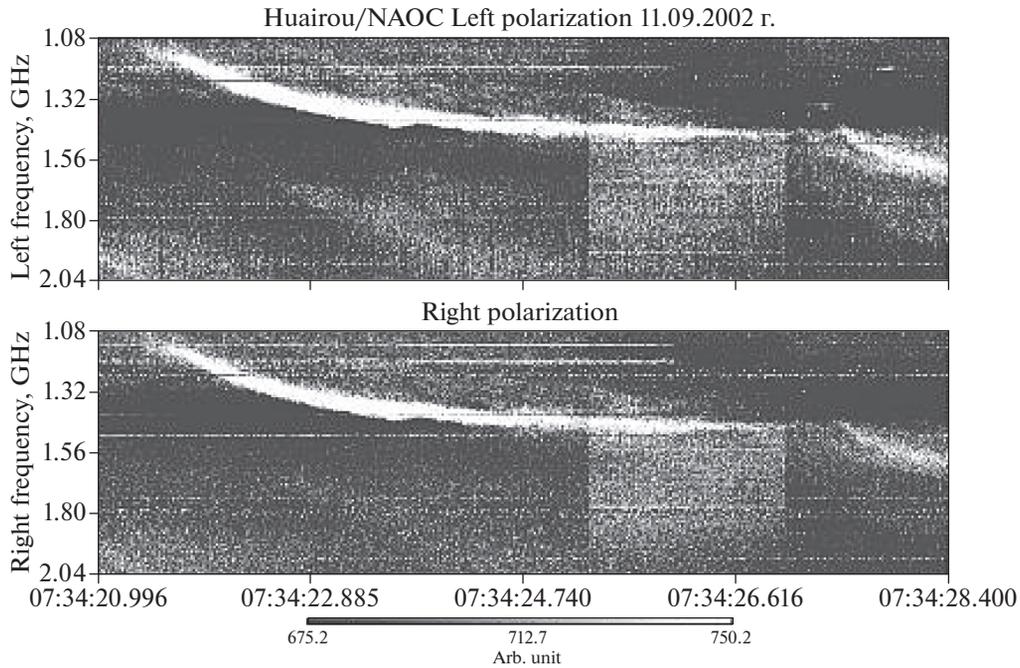


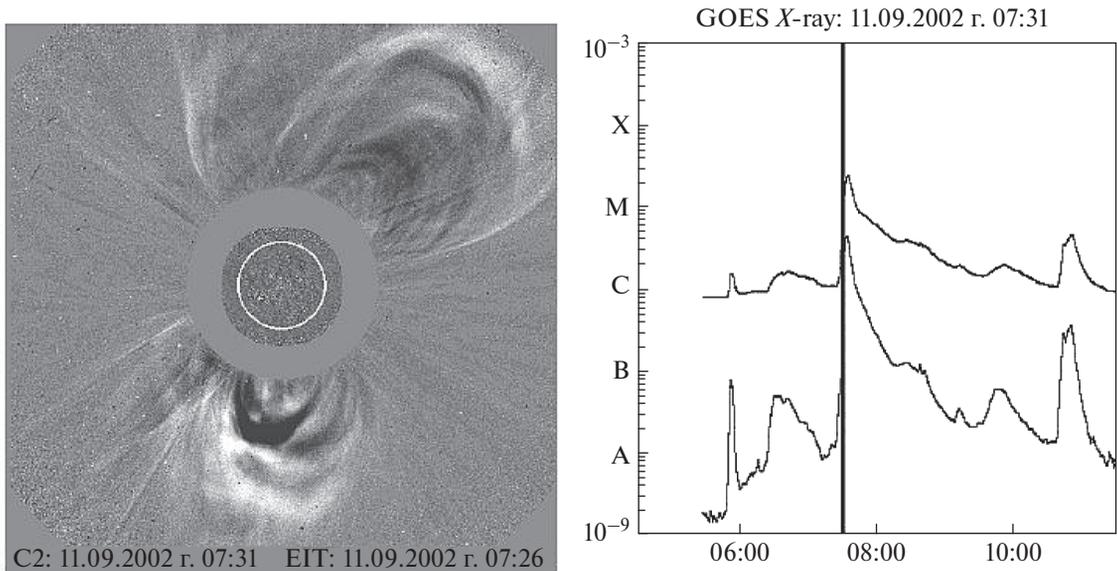
Рис. 10. Всплески, показывающие вершину петель на высотах частоты 1.56 ГГц с изгибом частотного дрейфа, где, вероятно, было положение termination shock.

ков I типа), служат основанием для сделанных ранее предположений [Mann et al., 2006, 2009; Warmuth et al., 2009; Aurass et al., 2013] о возможности появления ускоренных частиц в шлемовидных конфигурациях магнитного поля в результате действия различных механизмов ускорения частиц и различных механизмах генерации электромагнитного излучения, в том числе о важной роли стоячих ударных волн.

Теоретическое двумерное резистивное МГД-моделирование эволюции структуры магнитного поля с токовым слоем, часто используемой в стандартной модели солнечной вспышки, под воздействием внешнего воздействия [Chen et al., 2015] показало на возможность развития следующей цепочки физических процессов. 1) Движение противоположно направленных магнитных полей по разные стороны от токового слоя на-



**Рис. 11.** Последний всплеск с тем же ограничением дрейфа на частоте 1.56 ГГц. Излучение почти не поляризовано, источники располагались на вершинах петель.



**Рис. 12.** После вспышки класса M2.2 в АО 10105 был КВМ в южном направлении. Максимум радиовсплеска был в микроволновом диапазоне: 470 сеп на 8800 МГц. Максимум GOES X-rays совпал с максимумом вспышки в 07:31 UT.

встречу друг другу и утончение токового слоя. 2) Появление вследствие магнитного пересоединения двух потоков плазмы (джетов), один из которых направлен в сторону от солнечной поверхности, другой движется вниз, в сторону аркады вновь образующихся из-за магнитного пересоединения магнитных петель. 3) Развитие тиринг-моды и других неустойчивостей внутри токового

слоя, когда его толщина становится достаточно малой. В результате, в токовом слое появляются мелкомасштабные магнитные структуры, приводящие к появлению многочисленных X-образных магнитных нейтральных точек между каждой пары магнитных островов, первоначально квазистатический токовый слой переходит в неоднородное и динамическое состояние с перемежаю-

щими потоками. 4) Расположенная ниже аркада магнитных петель является преградой для движущего вниз потока, и когда скорость потока становится сверх альвеновской, формируется стоячая ударная волна (termination shock, TS). Параметры ударной волны (толщина, перемещение вверх или вниз) меняются в зависимости от параметров набегающих магнитных структур (островов) или потоков плазмы. Таким образом, дрейфовое ускорение частиц на верхних и нижних ударных волнах, образование магнитных облаков и взаимодействие их между собой, т.е. появление сложной нестационарной МГД-структуры в шлемовидной области, может привести к появлению электромагнитного излучения в различных участках спектра, в том числе радиовсплесков с необычными динамическими спектрами, приведенными в предыдущем разделе.

### 3.1. Явление 12 сентября 2004 г.

Наблюдаемое поведение рентгеновских источников соответствует магнитному пересоединению по стандартной модели вспышки на высотах, соответствующих плазменным частотам выше 3300 МГц (<15000 км). Верхняя стоячая ударная волна образовалась примерно в 00:30 UT в результате столкновения отходящего потока плазмы от области магнитного пересоединения с магнитным облаком, и последующие всплески (нижние спектры на рис. 2) имели примерно ту же частоту разворота дрейфа ~2600 МГц. Конечная ударная волна оставалась активным источником ускорения частиц вплоть до момента 00:35:45 UT, судя по тонкой структуре (спайки, волокна) на спектре последнего всплеска, показанного на рис. 2. Можно еще заметить, что к этому моменту она начала отходить вниз (с возможным ее разрывом), поскольку дрейф последнего всплеска остановился уже на частотах ~2800 МГц.

### 3.2. Явление 11 апреля 2004 г.

В этом явлении ударные волны выходили и вверх, и вниз, хотя в разные моменты. Первый всплеск на рис. 4 в 04:07 UT наблюдался в виде широкой полосы, дрейфующей к высоким частотам, не обнаруживая остановки дрейфа вплоть до границы спектра 2.06 ГГц. Последующий аналогичный всплеск уже имеет ограничение дрейфа на частоте ~1.7 ГГц. На рисунке 4 во втором всплеске, начавшемся в 04:10:45 UT, видим остановку дрейфа и последующее продолжение структурных полос с положительным частотным дрейфом. Вероятно, верхняя конечная ударная волна образовалась около 04:10:47 UT. Заметим, что начальные частоты этого всплеска (имеющей волокнистую и клочковатую структуру) приходятся как раз на границу остановки дрейфа

предыдущего всплеска 1.7 ГГц. Похоже, что ускорение (выброс) произошло в первой нижней TS. Однако через 1 с последующий всплеск (с характерным более континуальным излучением) имел начальные частоты >2 ГГц, не обнаруживая влияния этой нижней TS (возможно, после ее разрыва). Начало нижнего всплеска на рис. 5 можно заметить еще на предыдущем спектре в 04:11:02 UT, возможно, даже после его отражения от нижней TS. Таким образом, основная особенность этого явления состоит в том, что серия дрейфующих всплесков развивалась в области с магнитным пересоединением, а источники всплесков дрейфовали между нижней и верхней TS.

В начале вспышки ускорение частиц до формирования TS происходило с уровня <1 ГГц, а после ее разрушения – с уровня 1.34 ГГц.

### 3.3. Явление 18 ноября 2003 г.

Явление сопровождалось мощным КВМ, начало которого совпадает с максимумом радиовсплеска и мягкого рентгеновского излучения (GOES X-rays). В этом явлении имеет место дрейф всех полос к низким частотам, его остановка на частоте 2.5 ГГц и далее разворот на положительный дрейф, связанный с образованием верхней конечной ударной волны. Отражение от верхней TS свидетельствует о связи этого континуума с ударной волной. Отражение дрейфующего континуума совпадает с максимумом мягкого рентгена в 08:25 UT (рис. 8, левый верхний кадр, IC3 GOES). Источник жесткого рентгена в 08:10 UT располагается на вершине вспышечной петли (начало разогрева). В дальнейшем в 08:14 UT источники более энергичного канала 12–25 кэВ (RHESI spacecraft) располагаются в основаниях петель, если сопоставлять с магнитограммой (картой MDI). Такое поведение рентгеновских источников согласуется со стандартной моделью вспышки с магнитным пересоединением.

Появление новых источников жесткого рентгеновского излучения свидетельствует о новых актах ускорения частиц, и с этим связано появление зебра-структуры в дрейфующем континууме, причем в континууме как с прямым, так и с обратным дрейфом. Такое ускорение может происходить как в TS, так и в турбулентной плазме, захваченной между верхней TS и вспышечной петлей вниз.

### 3.4. Явление 11 сентября 2002 г.

Спектры в дециметровом диапазоне (рис. 10 и рис. 11) показывают, что с начала явления существовали две системы вспышечных петель: всплески, дрейфующие через весь диапазон 1–2 ГГц, явно связаны с большими петлями между основными пятнами сопряженной полярности, и

всплески, обнаруживающие остановку частотного дрейфа около частоты 1.56 ГГц (рис. 12), вероятно, связаны с соседними мелкими петлями. Обе системы петель существовали независимо в течение нескольких минут.

### 3.5. Выводы из наблюдений

Во всех явлениях радиовсплески, похожие на метровые всплески II типа, обнаруживали остановку частотного дрейфа и его разворот на обратный. Анализ всех возможных данных о соответствующих вспышках свидетельствует о формировании стоячих ударных волн (termination shock), во фронтах которых происходило дрейфовое ускорение частиц, что подтверждается рождением новых источников жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения быстрых всплесков (спайков), волокон и зебра-структуры.

Источники дрейфующих полос с разворотом дрейфа располагались или между вспышечной петлей и верхней TS, или между нижней и верхней TS. Во всех явлениях наблюдалась разнообразная тонкая структура, главным образом спайки, волокна и зебра-структура, что вполне объясняется ускорением частиц во фронте стоячей ударной волны. Радиоизлучение в явлениях 12 сентября 2004 г. и 18 ноября 2003 г. было сильно поляризовано.

Описанные стоячие ударные волны рассматривались до сих пор как ускорители быстрых электронов (дрейфовое ускорение), необходимых для объяснения генерации наблюдаемых всплесков в рентгене и в радиодиапазонах, не затрагивая происхождения самих полос в радиодиапазоне, напоминающих всплески II типа. Именно такой подход был использован в работе [Mann et al., 2006] при интерпретации одного из самых странных явлений 1 декабря 2004 г. с волокнами в дециметровом диапазоне с остановкой частотного дрейфа по данным наблюдений на китайском спектрографе.

Вместе с тем, в генерацию всплесков в радиодиапазоне существенный вклад могут внести сами стоячие ударные волны, для чего необходимо учесть их внутреннюю структуру. Действительно, если число столкновений в плазме достаточно мало, что имеет место в солнечной атмосфере (хромосфере и короне), фронт ударной волны представляет собой осцилляционную структуру, состоящую из последовательности уединенных волн сжатия или разрежения [Сагдеев, 1964]. Вид и масштаб этой структуры зависит от магнитного числа Маха  $M = V_{уд}/V_A$  (здесь  $V_{уд}$  – скорость ударной волны,  $V_A = H_0/(4\pi N_0 m_i)^{1/2}$  – альвеновская скорость), угла  $\Theta$  между плоскостью фронта и направлением невозмущенного магнитного поля  $H_0$ , а также от величины параметра

$\alpha = H_0^2/4\pi N_0 m_e c^2 = \omega_{H0}^2/\omega_{L0}^2$ . В последнем соотношении  $\omega_{H0} = eH/mc$ ,  $\omega_{L0} = (4\pi e^2 N_0/m_e)^{1/2}$ ,  $c$  – скорость света.

Как показано в работе [Зайцев, 1970], ударные волны имеют качественно различный характер при  $\Theta < \Theta_{кр}$  и при  $\Theta > \Theta_{кр}$  ( $\sin \Theta_{кр} = V_{уд}/c$ ). При  $\Theta < \Theta_{кр}$  ударный переход осуществляется через последовательность уединенных волн сжатия, а при  $\Theta > \Theta_{кр}$  – через последовательность волн разрежения. Характерный масштаб уединенной волны, например, для волн сжатия при  $\Theta \approx 0$  (квазипоперечное распространение)

$$\delta \approx c/\omega_{L0} (1 + \alpha + \alpha^2 m_e/m_i)/(1 + \alpha m_e/m_i)^{3/2}.$$

Неоднородность магнитного поля в солитонах заставляет электроны дрейфовать в плоскости ударного фронта. Относительная скорость дрейфа электронов и ионов

$$V_* = 4\sqrt{2/3}\sqrt{3c\omega_{H0}(\omega_{L0}^2 + \omega_{H0}^2)^{-1/2}(M-1)^{3/2}}$$

при выполнении условия [Зайцев, 1969]  $M > M_{кр} = 1 + \sqrt[3]{8\pi N_0 \alpha T(1 + \alpha)H_0^{-2}}$  (где  $\alpha = 1.38 \times 10^{-16}$  Эрг/град – постоянная Больцмана) превышает тепловую скорость электронов  $V_{Te} = (\alpha T/m_e)^{1/2}$ , что приводит к генерации плазменных колебаний (бунемановская неустойчивость), и как следствие, к генерации электромагнитного излучения. Такая схема позволила разработать наиболее полную модель источника классических радиовсплесков II типа [Зайцев, 1977], а также генерацию в некоторых явлениях тонкой структуры радиовсплесков этих типов в виде гармоник электронной плазменной частоты с высокими номерами ( $n > 2$ ) [Фомичев и др., 2013, 2018].

Как видно из предыдущего выражения, критическое значение числа Маха уменьшается с ростом магнитного поля и при  $\alpha \gg 1$  достигает значения  $M_{кр} = 1 + \sqrt[3]{2V_{Te}^2/c^2}$ . Квазипоперечные ударные волны при таких условиях как возможные источники цепочек всплесков I типа были проанализированы в публикации [Зайцев и Фомичев, 1972].

Что касается ударных волн, движущихся вдоль магнитного поля, то ламинарная структура таких ударных волн в плазме с  $\beta = 8\pi N_0 \alpha T/H_0^2 \ll 1$  существует в интервале  $1 < M < 1.5$ . Она имеет вид раскручивающейся спирали с шагом  $\delta \approx c/\omega_{Li}$  и величиной поперечного поля за фронтом  $H_{\perp} = \sqrt{2H_0}\sqrt{M^2 - 1}$  [Куртмуллаев и др., 1971]. Во фронте ударной волны также существует дрейфовый ток, направленный поперек возмущенного магнитного поля. Однако относительная скорость движения электронов и ионов  $V_d$  в том случае много меньше тепловой скорости электронов  $V_{Te}$ , по-

этому обычная бунемановская неустойчивость, имеющая место в перпендикулярных ударных волнах, не развивается. Вместо этого, в продольной ударной волне при  $T_e \approx T_i$  развивается модифицированная бунемановская неустойчивость, имеющая весьма низкий порог возбуждения  $V_d > V_{Ti}$ . Условие возбуждения начинает выполняться в сечениях фронта с  $H_{\perp} = 2H_0(M - 1)$  при числах Маха  $M > 1 + (V_{Ti}/2V_A)^{1/2}$  [Зайцев и Леденев, 1976].

В результате возбуждаются продольные волны на нижней гибридной частоте  $\omega \approx (\omega_{He}\omega_{Hi})^{1/2}$ , плотность энергии которых в режиме насыщения оказывается порядка  $W \approx nm_e V_d^2$  [Галеев и Сагдеев, 1973]. Энергия этих волн передается частицам, т.е. происходит нагрев плазмы во фронте ударной волны. Из соотношений на разрыве для продольной ударной волны следует, что кинетическое давление за фронтом ударной волны может достигать давления невозмущенного магнитного поля [Зайцев, 1977]. Это означает, что электроны нагреваются до температуры  $T_e \approx T_i \approx H_0^2/8\pi N_0$ , т.е. электроны приобретают среднюю тепловую скорость  $V_i \approx 1/2(m_i/m_e)^{1/2} V_A$ .

Для условий солнечной короны  $V_A \approx 5 \times 10^7 - 10^8$  см/с, поэтому  $V_i \approx (1-2) \times 10^9$  см/с, что существенно превышает тепловую скорость электронов в невозмущенной короне ( $V_{Te} \approx 5 \times 10^8$  см/с), а концентрация быстрых электронов, убегающих за пределы фронта согласно выводам работы Зайцева и Леденева [1976] может достигать значений  $N_s \sim 1/2(m_e/m_i)^{1/2} N_0 \approx 10^{-2} N_0$ .

Иными словами, фронт продольной ударной волны при  $\beta \ll 1$  и достаточно больших числах Маха является эмиттером быстрых электронов, которые попадая в холодную плазму перед фронтом, могут возбуждать здесь когерентные плазменные волны и являться источником радиоизлучения.

В реальных условиях, когда стоячая ударная волна образуется в результате набегания быстрого потока плазмы на аркаду магнитных петель, в разных частях фронта такая ударная волна может иметь свойства или перпендикулярных, или параллельных ударных волн. Для выполнения условий возбуждения турбулентности в ударных волнах необходимо, чтобы число Маха превысило соответствующее критическое значение  $M_{кр}$  (см. вышеприведенные выражения): для принятых параметров солнечной короны для продольной ударной волны  $M_{кр} \approx 1.2$ , для поперечной ударной волны  $M_{кр} \approx 1.05$  в случае  $\alpha \gg 1$  ( $\omega_{H0} \gg \omega_{L0}$ ) и  $M_{кр} \approx 1.16$  в случае  $\alpha \ll 1$  ( $\omega_{H0} \ll \omega_{L0}$ ). Выбирая обычные параметры для дециметрового диапазона  $n_0 = 10^{10}$  см<sup>-3</sup> (плазменная частота  $f_p = 900$  МГц), температуру  $T_e = 5 \times 10^6$  К,  $H_0 = 10$  Гс, получаем

$M_{кр} = 1.36$ . Для микроволнового диапазона:  $n_0 = 10^{11}$  см<sup>-3</sup> ( $f_p = 2846$  МГц),  $H_0 = 50$  Гс, получим  $M_{кр} = 1.52$ . Эти значения представляются легко преодолимыми. Более того, в силу изменчивости параметров набегающего потока такие стоячие ударные волны или их отдельные участки будут представлять переменные и мерцающие источники излучения с характерным временем, определяемым скоростью ударной волны и размером неоднородностей в короне. Так например, одной из причин прерывистого характера ударной волны могут быть флуктуации направления магнитного поля по отношению к скорости ударной волны. При небольшом отклонении  $\Theta$  от перпендикулярности условия возбуждения плазменных волн во фронте ударной волны становятся более жесткими, а при  $\Theta \geq V_{уд}/c \approx 0.033 \approx 2^\circ$  генерация плазменных волн практически полностью прекращается.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели четыре явления с радиовсплесками в дециметровом и микроволновом диапазонах, похожими на метровые всплески II типа. Анализируемые радиовсплески обнаруживали остановку частотного дрейфа и даже его разворот на обратный. Анализ всех возможных данных о соответствующих вспышках свидетельствует о возможном формировании стоячих ударных волн в конечные волны (termination shock), во фронтах которых происходило дрейфовое ускорение частиц.

Проведенные оценки возможных чисел Маха вспышечных ударных волн показали, что они вполне реализуемы во вспышечной плазме солнечной короны, и мы действительно наблюдаем всплески, которые отличаются от метровых всплесков II типа только меньшей длительностью в несколько секунд в соответствии с меньшими масштабами расстояний, на которые может распространяться ударная волна в области вспышки. События с сильной поляризацией излучения (явление 12 сентября 2004 г.) связаны с нижней стоячей ударной волной (т.е. вблизи вершин петельных структур), где магнитное поле может быть достаточно большим ( $\omega_H \geq \omega_L$ ). Во всех рассмотренных явлениях можно заметить смену характера излучения на более спорадический после разворота дрейфа. Это можно объяснить сменой вида распространения перпендикулярной ударной волны на квазипараллельный. Для параллельных ударных волн более эффективный механизм генерации связывается с высокой турбулентностью низкочастотных волн за ударным фронтом. Разворот ударного фронта определяется его каналированием вдоль направления, в котором число Маха возрастало, т.е. согласно формуле (1) в на-

правлении с растущей плотностью плазмы и уменьшения магнитного поля.

Для дальнейшего анализа наблюдаемых необычных радиовсплесков необходимо учесть также вклад возможных пакетов МГД-волн (альвеновских, быстрых магнитозвуковых волн) как источников дополнительного ускорения частиц, их динамику и особенности радиоизлучения (квазипериодические колебания).

Следует отметить, что генерация описанных явлений на постэруптивной фазе солнечных вспышек свидетельствует об их связи с процессами в шлемовидных магнитных структурах, где возможно сочетание большого набора физических процессов, например, магнитного пересоединения, ускорения частиц, образования взаимодействующих магнитных облаков, их взаимодействия между собой и с нижерасположенными арочными структурами, формирования стоячих ударных волн и т.д.

#### 4. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны китайским коллегам за любезно предоставленные спектры станции Hualou Национальной обсерватории Китая, а также М. Карлицкому за предоставленный спектр обсерватории Ондражейов (рис. 7). Авторы благодарны также командам КА RHESSI, GOES, LASCO за открытый доступ к их данным.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-02-00308) и Проекта Минобрнауки КП19-270.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галеев А.А., Сагдеев Р.З. Нелинейная теория плазмы // Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат. Вып. 7. С. 3–145. 1973.
- Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 560 с. 1964.
- Зайцев В.В. О структуре солитонов в разреженной плазме // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 12. № 5. С. 779–791. 1969.
- Зайцев В.В. О структуре релятивистских солитонов в магнитоактивной плазме // ЖЭТФ. Т. 58. № 4. С. 1359–1366. 1970.
- Зайцев В.В., Фомичев В.В. О происхождении цепочек всплесков I типа // Астрон. журн. Т. 49. № 4. С. 817–826. 1972.
- Зайцев В.В., Леденев В.Г. Генерация быстрых электронов в ударных волнах, распространяющихся вдоль магнитного поля // Письма в астрон. журн. Т. 2. № 9. С. 443–447. 1976.
- Зайцев В.В. К теории солнечных радио всплесков II и III типов // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 20. № 9. С. 1379–1398. 1977.
- Куртмуллаев Р.Х., Масалов В.А., Меклер К.И., Семенов В.Н. Ударные волны, распространяющиеся вдоль магнитного поля в бесстолкновительной плазме // ЖЭТФ. Т. 60. № 1. С. 400–407. 1971.
- Сагдеев Р.З. Коллективные процессы и ударные волны в разреженной плазме / Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат. Вып. 4. С. 20–79. 1964.
- Фомичев В.В., Файнштейн С.М., Чернов Г.П. О возбуждении гармоник ленгмюровской частоты электронов в атмосфере Солнца // Физика плазмы. Т. 39. С. 448–454. 2013.
- Фомичев В.В., Файнштейн С.М., Чернов Г.П. О возможности генерации гармоник ленгмюровской частоты электронов в атмосфере Солнца при развитии взрывной неустойчивости в системе из взаимопроникающих потоков электронов и ионов // Физика плазмы. Т. 44. С. 1–5. 2018.  
<https://doi.org/10.1134/S0367292118110045>
- Aurass H., Holman G., Braune S., Mann G., Zlobec P. Radio evidence for breakout reconnection in solar eruptive events // Astron. Astrophys. V. 555. A40. 2013.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321111>
- Chen B., Bastian T.S., Shen Ch., Gary D.E., Krucker S., Glesener L. Particle acceleration by a solar flare termination shock // American Association for the Advancement of Science. V. 350. № 6265. P. 1238–1242. 2015.
- Chernov G.P. Fine structure of solar radio bursts. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 282 p. 2011.
- Fu Qijun, Ji Huirong, Qin Zihai, et al. A New Solar Broad-band Radio Spectrometer (SBRS) in China // Solar Phys. V. 222. P. 167–173. 2004.
- Jiříčka K., Karlický M., Mészárosová H., Snížek V. Global statistics of 0.8–2.0 GHz radio bursts and fine structures observed during 1992–2000 by the Ondřejov radiospectrograph // Astron. Astrophys. V. 375. P. 243–250. 2001.
- Kundu M.R. Solar radio astronomy. New York. London. Sydney: Interscience Publishers, 660 p. 1965.
- Mann G., Aurass H., Warmuth A. Electron acceleration by the reconnection outflow shock during solar flares // Astron. Astrophys. V. 454. С. 969–974. 2006.
- Mann G., Warmuth A., Aurass H. Generation of highly energetic electrons at reconnection outflow shocks during solar flares // Astron. Astrophys. V. 494. P. 669–675. 2009.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810099>
- Markeev A.K., Fomichev V.V., Chertok I.M., Bhatnagar A., Jain R.M., Shelke R.N., Bhonsle R.V. U-shaped type II solar radio bursts associated with the 1980 March 28 flare // Bull. Astr. Soc. India. V. 11. P. 318–326. 1983.
- Warmuth A., Mann G., Aurass H. Modelling shock drift acceleration of electrons at the reconnection outflow termination shock in solar flares. Observational constraints and parametric study // Astron. Astrophys. V. 494. P. 677–691. 2009.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810101>
- Wild J.P., Smerd S.F. Radio bursts from the solar corona // Annu. Rev. Astron. Astr. V. 10. P. 159–190. 1972.