

УДК 523.985

ТОНКАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ IV ТИПА, СВЯЗАННЫХ СО СТАЦИОНАРНЫМИ И ДВИЖУЩИМИСЯ ИСТОЧНИКАМИ

© 2023 г. В. В. Фомичев¹, *, Г. П. Чернов¹, **

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

*e-mail: fomichev@izmiran.ru

**e-mail: gchernov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.07.2022 г.

После доработки 31.10.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Рассмотрены различные виды тонкой структуры в континуальном излучении радиовсплесков IV типа применительно к разным типам источников излучения, стационарным и движущимся. В случае стационарных источников происхождение тонкой структуры связано как с процессами в отдельных магнитных петлях (квазипериодическое ускорение, магнитогидродинамические волны), так и с крупномасштабными процессами, связанными с распространением магнитогидродинамических возмущений, формированием петельных аркад и синхронными с ними процессами дискретного ускорения частиц, обуславливающих пульсирующий характер радиоизлучения. Для случая движущегося источника механизм генерации в значительной степени зависит от магнитной структуры источника (расширяющаяся магнитная арка или изолированное плазменное облако). В этом случае важна также связь с корональными выбросами массы и ударными волнами. Секундные пульсации объясняются магнитогидродинамическими колебаниями источника в виде магнитной петли или облака. Отсутствие прочей тонкой структуры в континууме движущихся всплесков IV типа может быть связано с критическим углом конуса потерь для возбуждения вистлеров.

DOI: 10.31857/S0016794022600466, EDN: DLPJHG

1. ВВЕДЕНИЕ

Из всех типов солнечных радиовсплесков континуальные радиовсплески IV типа характеризуются наиболее разнообразной и сложной тонкой структурой динамических спектров. Большинство таких всплесков связаны с мощными вспышками и корональными выбросами массы (КВМ). Тонкая структура континуального радиоизлучения изучается начиная с 1959 г. после наблюдений Elgarøy [1959]. Многообразие видов тонкой структуры затрудняет ее классификацию, и это, в свою очередь, затрудняет ее интерпретацию. Тем не менее, можно выделить основные элементы тонкой структуры, а также наиболее характерные сочетания этих элементов. При этом, согласно данным наблюдений на радиоинтерферометрах и радиогелиографах, источники радиовсплесков IV типа могут быть как неподвижными, так и обнаруживать движение. Соответственно источники радиоизлучения в таких случаях называют “стационарные источники” и “движущиеся источники”. Поэтому при теоретической интерпретации тонкой структуры радиовсплесков необходимо

учитывать тип источника и физические условия, в которых реализуется тот или иной механизм генерации.

В данной статье на базе имеющихся экспериментальных данных предпринята попытка провести классификацию тонкой структуры радиовсплесков IV типа с учетом типа источника.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ДВИЖУЩИХСЯ РАДИОВСПЛЕСКАХ IV ТИПА

Динамические спектры движущихся источников представляют собой равномерный континуум, дрейфующий к низким частотам в метровом диапазоне волн (обычно <200 МГц) в течение десятков минут, одновременные стационарные всплески более длительны (часы), чем движущиеся. Большой прогресс в наблюдениях движущихся всплесков IV типа был достигнут благодаря вводу в действие Кулгуровского радиогелиографа сначала на частоте 80 МГц, затем на частотах 40, 160 и 320 МГц [Wild, 1967]. На рис. 1 приведен пример движущегося источника всплеска IV типа (“изо-

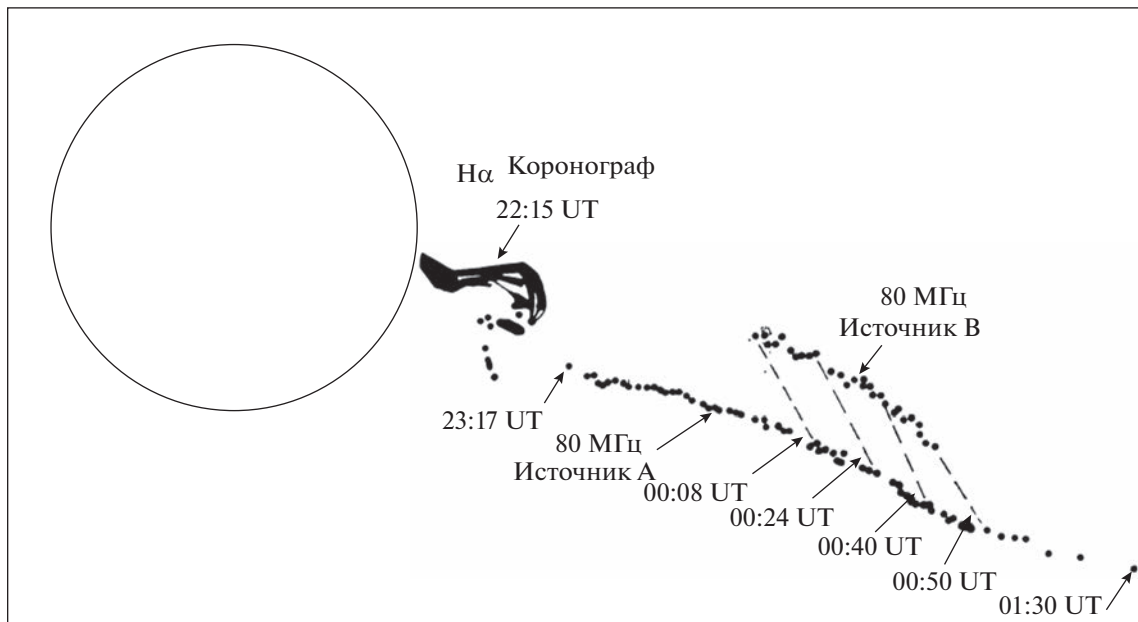


Рис. 1. Пространственная связь между поднимающимся протуберанцем, наблюдавшимся в $H\alpha$ (эскиз с фотографии), и радиогелиограмма источников на 80 МГц (показанная положениями центров со временем). (Фрагмент рис. 3 из работы [Riddle, 1970]).

лированное плазменное облако”), когда источник излучения на фиксированной частоте 80 МГц двигался радиально до очень больших высот. Такие свойства источника согласуются с магнитотормозной природой излучения умеренно релятивистских электронов в магнитном поле облака. Gary et al. [1985] рассматривали движущийся радиовсплеск IV типа 29 июня 1980 г. в 02:33 UT на трех частотах Кулгуровского радиогелиографа, 40, 80 и 160 МГц с одновременными наблюдениями на коронографе SMM. Авторы проверили уже известные наблюдения [Riddle, 1970] (см. рис. 1) и показали, что излучение движущегося всплеска было на второй гармонике плазменной частоты. Источник на 80 МГц двигался вдоль плотной части КВМ на плазменном уровне 40 МГц (плазменный механизм).

Другой разновидностью движущихся источников всплесков IV типа является поднимающийся ударный фронт (рис. 2а), где появление радиоизлучения связывается с синхротронным излучением электронов, ускоренных на ударной волне [Boischot, 1957; Gopalswami, 2016].

Получение изображений источников радиовсплесков IV типа привело к гораздо лучшему пониманию развития источников и процессов генерации излучения [Pick and Vilmer, 2008]. Было установлено, что наиболее вероятным является плазменный механизм излучения на основной плазменной частоте или на ее второй гармонике. Подобное заключение было сделано в работе [Trottet et al., 1981] для объяснения кратковремен-

ных модуляций излучения движущегося источника радиовсплеска IV типа. Движущиеся радиовсплески связывались с электронами с энергиями порядка нескольких МэВ, инжектированными в расширяющиеся магнитные арки позади переднего края КВМ. Некоторые узкополосные всплески связывались с взрывными выбросами [Pick et al., 2006].

С развитием оптических наблюдений на коронографах (SOHO/LASCO) движущиеся радиовсплески IV типа стали использовать для понимания природы КВМ из-за их тесной пространственно-временной связи. Континуум обычно не содержит тонкой структуры, за исключением пульсаций с секундными или минутными периодами. Примеры можно видеть на спектрах нового радиоспектрографа в диапазоне 85–35 МГц (Gauribidanur Low Frequency Solar Spectrograph близ Бангалора, Индия) [Ramesh et al., 2013].

Разнообразные виды тонкой структуры радиовсплесков описаны во многих статьях (см., например, [Chernov, 2011] и цитированную там литературу). Наиболее характерными элементами являются: а) волокно (*fiber burst*) — выглядит на динамическом спектре как узкополосное дрейфующее уярчение континуума, сопровождаемое с низкочастотной стороны аналогичной полосой в поглощении; б) пульсации — квазирегулярная последовательность широкополосных усилений и ослаблений континуума, обычно без заметного частотного дрейфа; в) зебра-структура — система чередующихся по частоте многочисленных полос

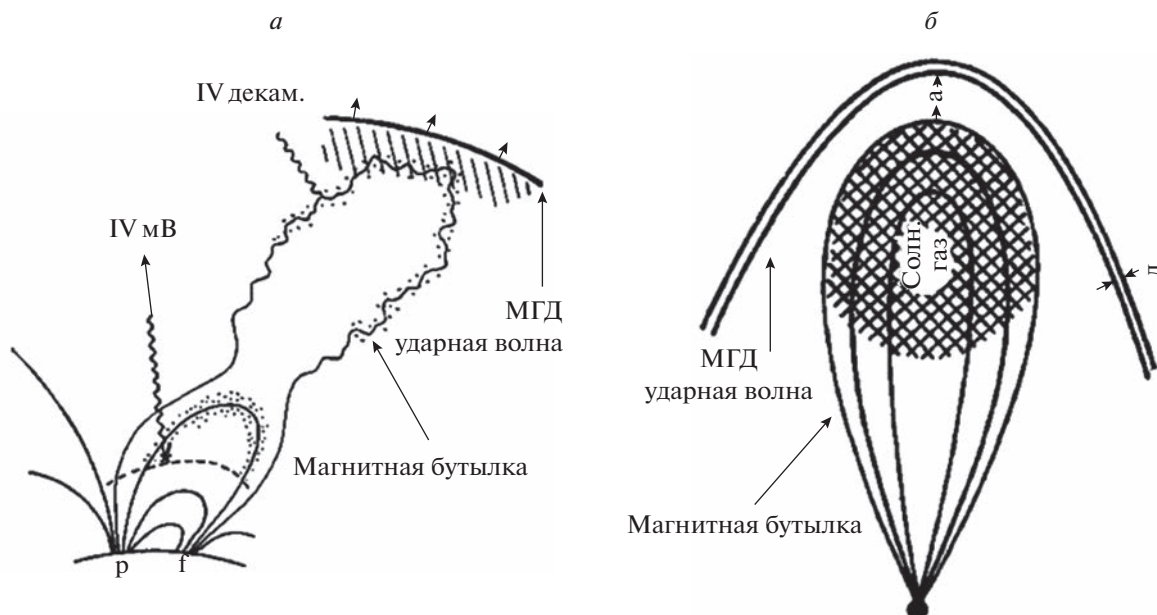


Рис. 2. Два типа возможных источников движущихся радиовсплесков IV типа: (а) — передвигающийся фронт и (б) — магнитное облако [Gopalswami, 2016].

в излучении и поглощении. Наблюдаются как регулярные зebra-структуры, когда полосы характеризуются почти постоянным или плавно меняющимся частотным дрейфом, так и нерегулярные, или нестационарные, зebra-структуры с неоднократными и резкими изменениями величины и направления частотного дрейфа практически синхронно во всех полосах; г) спайки (*spikes*) — узкополосные и кратковременные всплески на фоне континуального излучения и др. Во время мощных солнечных вспышек различные типы тонкой структуры могут наблюдаться в различных сочетаниях.

2.1. Вспышка Бастилия 14 июля 2000 г.

Наглядным примером движущегося источника всплеска IV являются наблюдения динамических спектров в ходе знаменитой вспышки Бастилия 14 июля 2000 г. (X5.7/3B-class eruptive flare) [Reiner et al., 2001; Chertok et al., 2001]. Подробный анализ тонкой структуры радиовсплеска в метровом диапазоне представлен в работах [Chertok et al., 2001 и Caroubalos et al., 2001]. На спадающей фазе вспышки в диапазоне 270–180 МГц спектра по спектрографу ИЗМИРАН на рис. 3 отмечен дрейфующий континуум без каких-либо четких признаков тонкой структуры. По данным радиоспектрографа ARTEMIS–IV отсутствие тонкой структуры в дрейфующем континууме подтверждается и на более высоких частотах, до 600 МГц (рис. 4).

Важно, что этот континуум сопровождал радиовсплеск II типа на более низких частотах.

И только позднее появились пульсации с периодами десятки секунд, но относящиеся, скорее всего, к возникшему стационарному радиоисточнику IV типа (рис. 5d в работе [Chertok et al., 2001]). Богатая тонкая структура наблюдалась в стационарном континууме с 10:38 UT до 10:50 UT в диапазоне 250–430 МГц в виде многочисленных волокон (*fiber bursts*) на фоне секундных пульсаций. Наглядный пример такой тонкой структуры представлен в работе [Caroubalos et al., 2001]. Фрагмент рис. 6 из этой работы показан на рис. 5.

Принимая возможную модель радиоисточников, показанную на рис. 2, можно сказать, что богатая тонкая структура на высоких частотах метрового диапазона возбуждалась в источнике типа замкнутых петель (магнитной ловушки), а источник дрейфующего континуума находился выше в магнитном облаке над продвигающимся фронтом.

Анализ одновременных динамических спектров ИЗМИРАН и китайских спектрографов в диапазоне 1–7.5 ГГц показал, что дрейфующий континуум появился еще на частотах около 1.5 ГГц, как и не дрейфующий, после 10:45 UT. В работе [Wang et al., 2001] спектр, полученный на спектрографе ИЗМИРАН, совмещен со спектрами китайских спектрографов в диапазоне 1–7.5 ГГц, а тонкая структура в виде дрейфующих волокон в диапазоне частот 5.2–7.0 ГГц зарегистрирована в начале явления и в диапазоне частот 1.0–1.3 ГГц в самом конце явления.

Существенная особенность вспышки Бастилия выявляется при совместном анализе динамических спектров спектрографов ИЗМИРАН, дан-

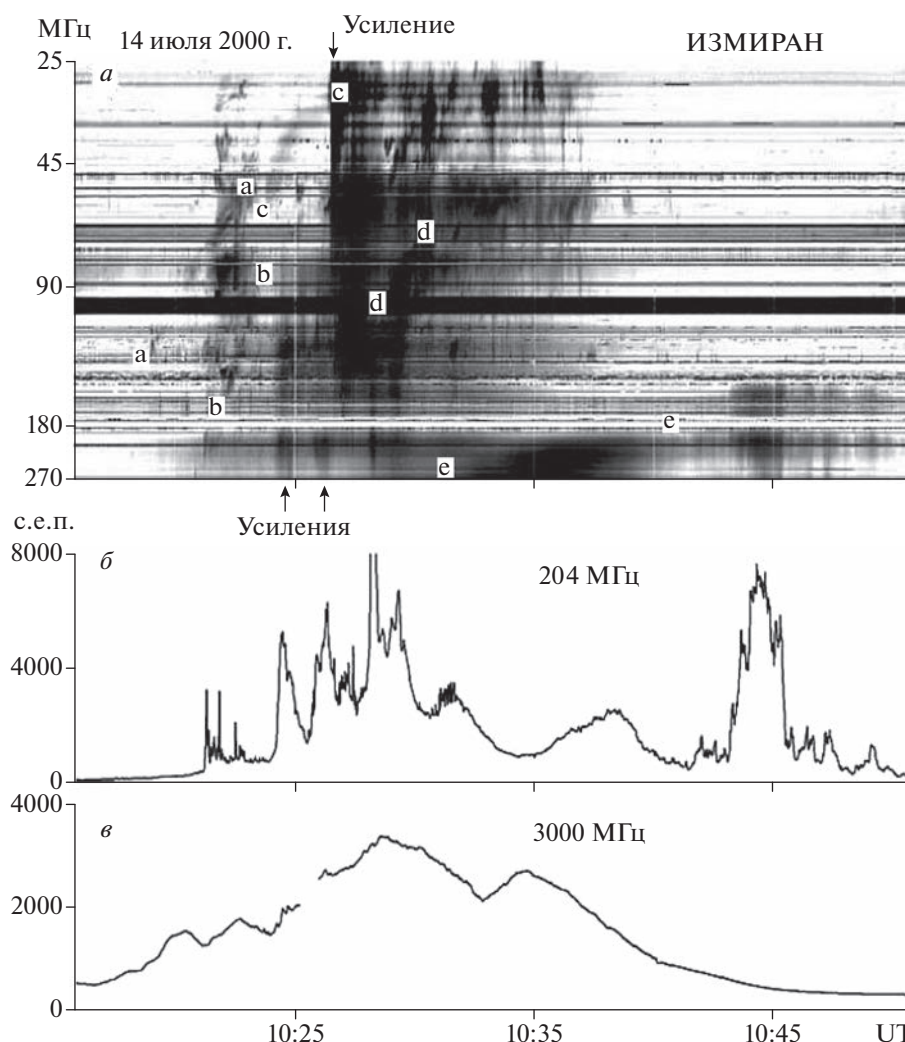


Рис. 3. Вспышка Бастилия 14 июля 2000 г. По данным ИЗМИРАН: (а) — динамический спектр в диапазоне 25–270 МГц; (б) и (в) — временные профили на 204 и 3000 МГц. По вертикальным осям на частях (б) и (в) 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/м² Гц. На спектре (а) выделяются несколько всплесков II типа (aa, bb, cc) и медленно дрейфующий дециметровый континуум (ee) (рис. 3 в работе [Chertok et al., 2001]).

ных коронографа в белом свете SOHO/LASCO и детальных изображений в ультрафиолетовом диапазоне TRACE EUV [Chertok et al., 2001; Aschwanden and Alexander, 2001; Masuda et al., 2001]. Оказалось, что наблюдаемые на разных фазах вспышки пульсации радиоизлучения совпадали с формированием магнитных петельных аркад, причем временные характеристики отдельных пульсаций практически совпадали с временем формирования отдельных петель и временными интервалами между ними.

2.2. Явление 3 ноября 2003 г.

В уникальном явлении 3 ноября 2003 г. в излучении движущегося континуума наблюдались необычные волокна в метровом диапазоне, переходящие в дециметровый диапазон на спектре

WIND/WAVE (рис. 6). Движение радиоисточника в метровом диапазоне показано на рис. 6 в работе [Vršnak et al., 2006] по положениям источников на нескольких частотах радиогелиографа Нансэ (Франция, Nançay). Радиоисточник волокон находился между двумя ударными фронтами после обгона быстрым фронтом медленного [Chernov et al., 2007a]. Частотный дрейф волокон был близок к дрейфу полосы всплеска II типа, и излучение волокон, возможно, было вызвано повышенным излучением из неоднородностей в хвосте КВМ. Таким образом, необычные узкополосные волокна оказываются преобладающим типом тонкой структуры в дрейфующем континууме.

Похожие волокна наблюдались и ранее благодаря одновременным наблюдениям на спектрографах ИЗМИРАН и УТР-2 [Chernov et al., 2007b]. В двух явлениях на фоне диффузного континуума

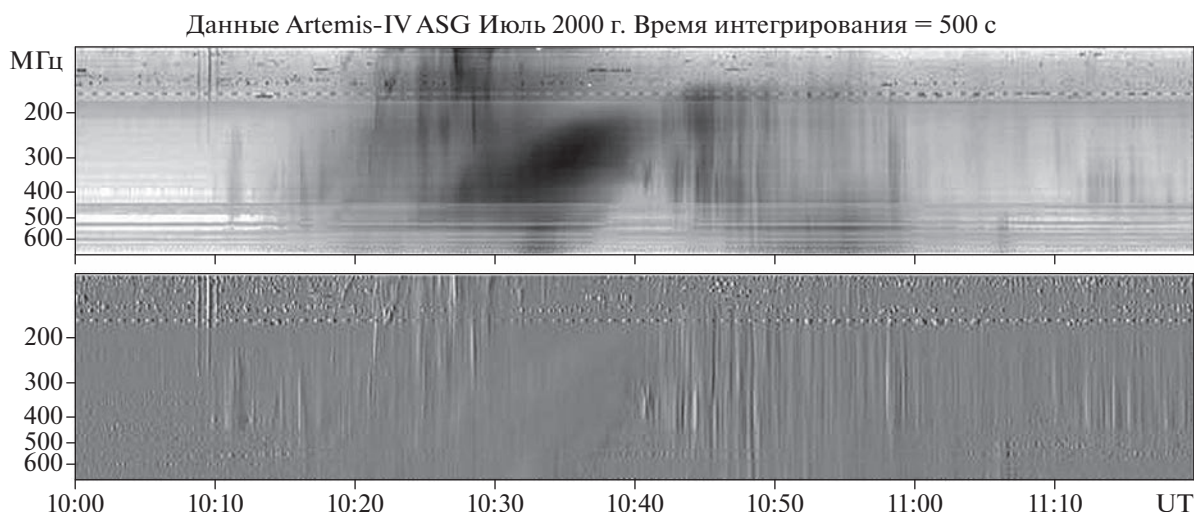


Рис. 4. По данным радиоспектрографа ARTEMIS – IV отсутствие тонкой структуры в дрейфующем континууме подтверждается и на более высоких частотах, до 600 МГц ARTEMIS – IV (фрагмент рис. 2 в работе [Caroubalos et al., 2001]).

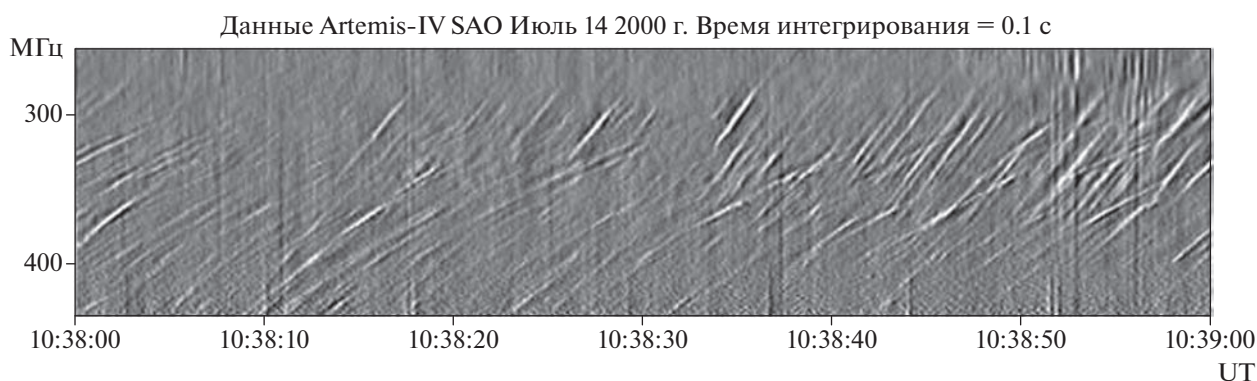


Рис. 5. Поведение производной сигнала спектра вспышки Бастилия спектрографа в течение одной минуты в диапазоне 265–241 МГц. Тонкая структура стационарного источника впечатляет своей сложностью: два семейства волокон (*fiber bursts*) с разным частотным дрейфом и накладывающихся друг на друга наблюдались на фоне быстрых широкополосных пульсаций излучения. На высокочастотном краю спектра видна развитая зebra-структура. (Фрагмент рис. 6 из работы [Caroubalos et al., 2001]).

наблюдались медленно дрейфующие волокна в течение почти 4 мин на частотах 28–18 МГц 16 августа 2002 г. и два фрагмента волокон в течение 25 и 50 с на частотах 19–21 МГц и 27.5–29.5 МГц соответственно 18 августа 2002 г. (рис. 5 и 6 в работе [Chernov et al., 2007b]).

Радиоисточники обоих явлений располагались между передним краем КВМ и догоняющими его быстрыми ударными фронтами, а излучение исходило из вытянутых плазменных неоднородностей в хвосте КВМ. Интересно отметить, что в первом (и очень слабом явлении) волокна обнаруживали сверхтонкую структуру в виде периодических волокон (*fiber bursts*), причем длительные волокна становятся похожи на жгуты волокон [Chernov, 2008]. Допускается, что возбуждение жгутов (*rope-like*) связано с генерацией вистлеров в магнитной ловушке между передним

краем КВМ и ударным фронтом, где формируется функция распределения энергичных электронов по скоростям с конусом потерь. Поэтому даже один пучок частиц за счет баунс-движений в такой ловушке приведет к периодическому возбуждению вистлеров. Таким образом, радиоисточник движущегося всплеска IV типа не всегда однозначно объясняется продвигающимся фронтом с магнитным облаком (рис. 2), в каждом явлении источники обладают своими особенностями.

Пульсации излучения с периодами в десятки секунд, вероятно, связаны с МГД-колебаниями или МГД-волнами, распространяющимися снизу от области вспышки.

В последние годы развитие наблюдений с помощью сети радиоспектрографов CALLISTO и LOFAR позволяет более детально анализировать движущиеся радиовсплески. Morosan et al. [2021]

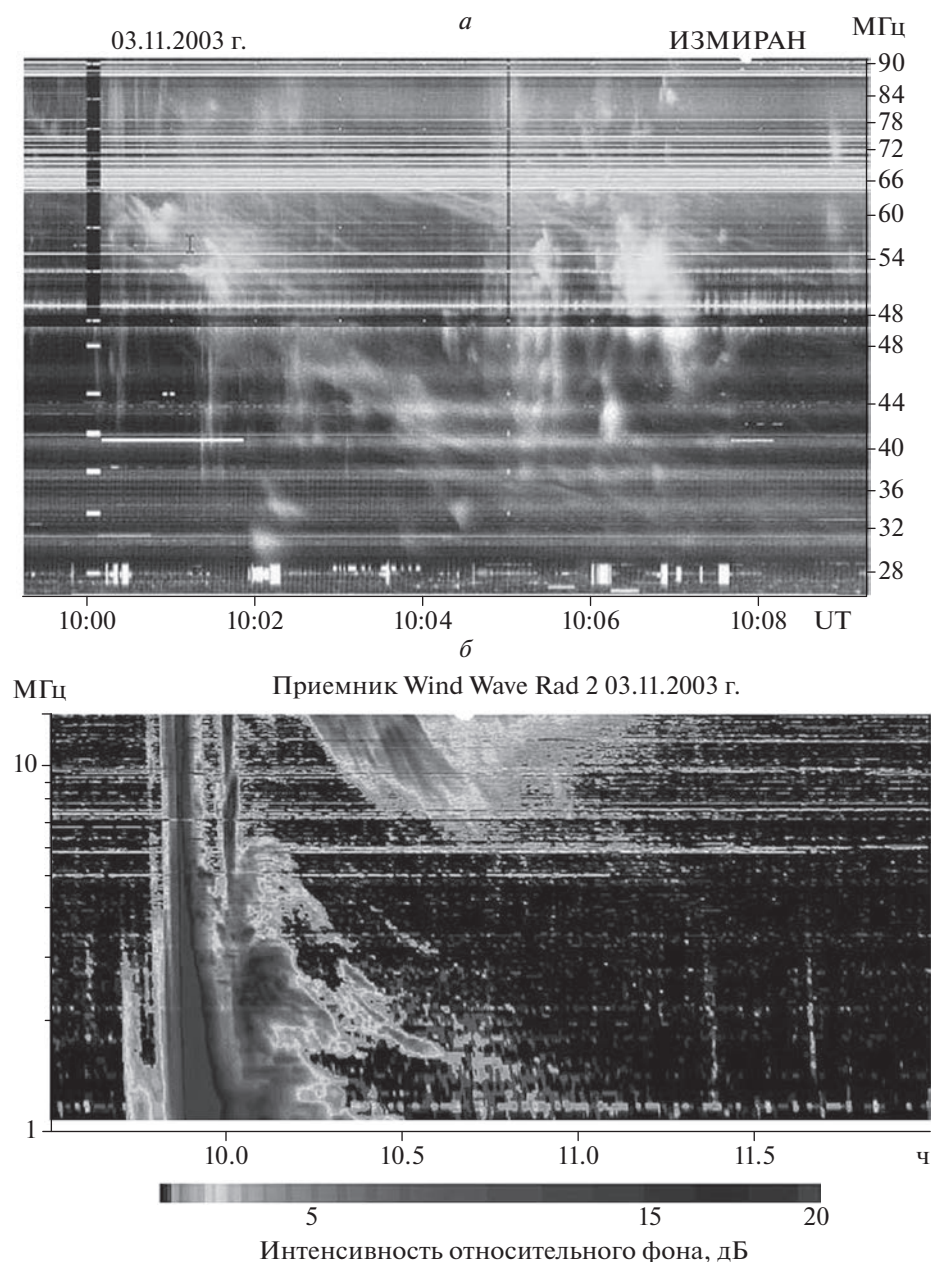


Рис. 6. Продолжение волокнистой структуры в континуальном излучении из метрового диапазона в декаметровый и фрагменты U -всплеска и волокон во всплеске II типа в низкочастотной части спектра: (а) спектр спектрографа ИЗМИРАН в диапазоне 90–25 МГц, (б) Спектр RAD2, WIND/WAVE 14–1 МГц (рис. 6 в работе [Chernov et al., 2007a]).

показали, что половина всех всплесков IV типа связаны с движущимися источниками. Обнаружена более тесная связь с КВМ, позволяющая анализировать механизм ускорения частиц в хвосте КВМ. В этой работе авторы допускают возможность магнитотормозной природы источника радиоизлучения на начальном временном этапе с преобладанием плазменного механизма на последующем этапе, когда источник поднимается на большие расстояния.

3. МОДЕЛИ ИСТОЧНИКОВ И ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

На основании совокупности экспериментальных данных можно отметить следующие характеристики источников континуальных всплесков IV типа.

1. Стационарные источники — широкий диапазон частот (от микроволнового до метрового диапазона длин волн), большое разнообразие

тонкой структуры (зебра-структура, пульсации, волокна, спайки, точки в излучении и поглощении, “головастики” и др., а также их сочетания).

2. Движущиеся источники — диапазон частот от дециметрового до декаметрового диапазона, тонкая структура — пульсации, волокна.

В большинстве работ теоретическая интерпретация тонкой структуры радиовсплесков IV типа, связанных со стационарными источниками, основана на анализе физических процессов в отдельной арке — магнитной петле, в которой естественным образом формируются распределения быстрых частиц с конусом потерь. Так, в рамках такой модели источника была развита наиболее распространенная теория генерации зебра-структуры — излучение на различных уровнях двойного плазменного резонанса (ДПР), где верхняя гибридная частота (ω_{UH}) становится равной целому числу электронных циклотронных гармоник $s\omega_{Be}$:

$\omega_{UH} = (\omega_{Pe}^2 + \omega_{Be}^2)^{1/2} = s\omega_{Be}$ [Железняков и др., 2016]. В качестве альтернативного механизма обсуждается механизм нелинейного взаимодействия ленгмюровских плазмонов с вистлерами $l + w\Delta t$ в источнике типа магнитной ловушки. В рамках таких же представлений можно объяснить генерацию волокон в излучении и поглощении [Chernov, 2011].

При инжекции в ловушку ускоренных электронов с неравновесным распределением по моментам возможно развитие циклотронной неустойчивости мод Бернштейна с их нелинейной конверсией (слиянием) в электромагнитные волны. Такая модель позволяет объяснить генерацию “головастиков” и их различные разновидности [Zheleznyakov and Zlotnik, 1975].

Ряд моделей предложен для объяснения пульсаций радиоизлучения, обусловленных вариациями параметров среды (плотности, магнитного поля), связанными с быстрыми магнитозвуковыми волнами, возбуждаемыми в магнитных трубках. При интерпретации пульсаций при плазменном механизме генерации континуума периодическая модуляция радиоизлучения может быть также следствием пульсирующих режимов пучковой и конусной неустойчивостей [Зайцев и Степанов, 1975].

Другой подход к объяснению пульсаций основан на анализе вспышек со сложной пространственно-временной структурой. В таких вспышках процесс длительного энерговыделения происходит последовательно в разных местах в активной области [Ishkov et al., 1985]. Так, в известной вспышке Бастилия была установлена тесная корреляция появления последовательности отдельных кратковременных широкополосных всплесков радиоизлучения (которые могут классифицироваться как пульсации) и образования отдельных

магнитных петель. Поскольку в сложных вспышках такие структуры наблюдаются на постэруптивной фазе, общая картина может включать распространение крупномасштабного возмущения в солнечной атмосфере, инициирующее последовательные процессы пересоединения магнитных силовых линий (например, в шлемовидных конфигурациях магнитного поля), и одновременное ускорение частиц, образование магнитных петель (в совокупности формирующих магнитную аркаду) и генерацию отдельных всплесков радиоизлучения при инжекции ускоренных частиц в отдельные петли (примером такой ситуации может служить вспышка Бастилия [Reiner et al., 2001; Chertok et al., 2001]).

Более сложная ситуация пока существует с интерпретацией тонкой структуры в движущихся источниках всплесков IV типа. Во-первых, экспериментальные данные не позволяют сделать окончательное заключение о природе механизма генерации самого континуального радиоизлучения, в разных случаях существуют аргументы как в пользу плазменного механизма генерации, так и в пользу магнитотормозного (синхротронного) механизма, или в их комбинации. Во-вторых, в отличие от стационарных источников, не ясна геометрическая структура источника — магнитное облако или вытягивающаяся область (возможно, магнитная трубка) вслед за крупномасштабным возмущением. В обоих случаях очевидна связь источников радиоизлучения с КВМ и ударными волнами (всплесками II типа).

Краткий обзор тонкой структуры в известных явлениях показывает, что в движущихся радио-всплесках лишь иногда появляются широкополосные пульсации с периодами в несколько секунд или десятков секунд. В нескольких явлениях со специфическими особенностями источников (обгоняющие фронты) наблюдались серии волокон с частотным дрейфом, характерным для всплесков II типа. При этом эти волокна иногда обнаруживают сверхтонкую структуру в виде жгутов волокон. Последние связывались с источником между ударными фронтами, в котором возможно возбуждение периодических пакетов вистлеров.

Магнитное облако, показанное на рис. 2 в виде источника континуального излучения движущегося всплеска IV типа, является ловушкой для вспышечных электронов и протонов. Магнитная петля с повышенной плотностью является резонатором для быстрых магнитозвуковых волн, возбуждаемых ускоренными протонами [Rosenberg, 1970]. Период колебаний быстрой МГД-моды в петле с радиусом R много меньше длины L , примерно равен величине $T \approx R(C_A + C_s)^{-1/2}$, где C_A — альвеновская скорость, C_s — скорость звука. Для реальных значений в короне величины $(C_A + C_s)^{1/2} \approx 10^8 \text{ см с}^{-1}$ и $R \approx 10^8 - 10^9 \text{ см}$ период колебаний мо-

жет меняться от 1 до 10 с. Быстрая МГД-мода колебаний меняет пробочное отношение в петле с таким периодом. В рамках плазменного механизма континуальное излучение возбуждается энергичными электронами с конусной неустойчивостью, поэтому МГД-колебания могут привести как к периодической модуляции высыпавшихся из ловушки энергичных электронов, так и к изменению параметров плазмы в источнике, и в итоге — к пульсации радиоизлучения с таким же периодом [Zaitsev et al., 1984]. В источниках, представляющих собой магнитную ловушку для энергичных электронов, могут также возбуждаться одновременно вистлеры и ленгмюровские волны, слияние которых будет приводить к генерации волон в составе всплесков IV типа.

Но надо еще понять, почему другие виды тонкой структуры (волокна, спайки, зебра-структура) обычно не наблюдаются и появляются лишь в специфических условиях, когда источник располагается, например, между двумя ударными фронтами [Chernov et al., 2007a].

Такая причина может быть связана с критическим углом конуса потерь для возбуждения вистлеров. Согласно оценкам [Mann et al., 1989] для условий солнечной короны этот угол составляет $\sim 3.58^\circ$ и увеличивается с ростом напряженности магнитного поля. Попытки связать увеличение поля с прохождением быстрой МГД-моды дают слишком малый рост $\sim 10^{-2}$, что недостаточно для заметного роста питч-угла [Mann et al., 1989]. Однако, если возмущающим агентом является ударный фронт, в котором поле повышается в несколько раз, конусная неустойчивость резко усиливается.

4. ВЫВОДЫ

Большое разнообразие тонкой структуры динамических спектров (временных и спектральных параметров) солнечных континуальных радиовсплесков IV типа свидетельствует с одной стороны о большом разнообразии физических параметров источников радиоизлучения (магнитные петли, аркады петель, магнитные облака, области за КВМ и ударными волнами), с другой — о возможной связи с различными механизмами генерации радиоизлучения (магнитотормозной, плазменный). Тесная связь радиовсплесков IV типа с распространением КВМ в солнечной атмосфере свидетельствует также о тесной связи характеристик радиоизлучения с физическими процессами, сопровождающими крупномасштабные возмущения, в частности с перестройкой магнитной структуры активных областей, процессами магнитного пересоединения, ускорения частиц и генерации турбулентности различного типа. Для выяснения связи всех этих процессов с тонкой структурой радиовсплесков необходимы даль-

нейшие наблюдения и исследования радиовсплесков с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением. В частности, важным является исследование параметров источников отдельных импульсов и их вариаций в составе длительных квазипериодических структур континуальных радиовсплесков IV типа. Отсутствие прочей тонкой структуры в континууме движущихся всплесков IV типа может быть связано с критическим углом конуса потерь для возбуждения вистлеров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны командам КА RHESI, GOES, LASCO за открытый доступ к их данным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Проекта Министерства науки и высшего образования РФ КП19-270.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Железняков В.В., Злотник Е.Я., Зайцев В.В., Шапошников В.Е. Эффект двойного плазменного резонанса и его роль в радиоастрономии // УФН. Т. 186. С. 1090–1116. 2016.
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.05.037813>
- Зайцев В.В., Степанов А.В. О природе пульсаций солнечного радиоизлучения IV типа // Исслед. по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. Вып. 37. С. 11–18. 1975.
- Aschwanden M.J., Alexander D. Flare plasma cooling from 3 MK down to 1 MK modeled from *Yohkoh*, GOES, and TRACE observations during the Bastille Day Event (14 July 2000) // Sol. Phys. V. 204. P. 91–120. 2001.
- Boischoat A. Caracteres d'un type d'emission hertzienne associe a certaines Eruptions chromospheriques // Comptes Rendus, Acad. Sci. Paris. V. 244. P. 1326–1329. 1957.
- Caroubalos C., Alissandrakis C.E., Hillaris A. et al. ARTEMIS IV radio observations of the 14 July 2000 large solar event // Sol. Phys. V. 204. P. 167–179. 2001.
- Chernov G.P. Fine structure of solar radio bursts. Heidelberg: Springer, 282 p. 2011.
- Chernov G.P., Kaiser M.L., Bougeret J.-L., Fomichev V.V., Gorgutsa R.V. Fine structure of solar radio bursts observed at decametric and hectometric waves // Sol. Phys. V. 242. P. 145–169. 2007a.
<https://doi.org/10.1007/s11207-007-0258-y>
- Chernov G.P., Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A. et al. Fine structure of decametric type II radio bursts // Astronomy Letters. V. 33. P. 192–202. 2007b.
<https://doi.org/10.1134/S1063773707030061>
- Chernov G.P. Unusual stripes in emission and absorption in solar radio bursts: Ropes of fibers in the meter wave band // Astron. Lett. V. 34. P. 486–499. 2008.
<https://doi.org/10.1134/S1063773708070074>
- Chertok I.M., Fomichev V.V., Gnezdilov A.A. et al. Multi-scale temporal features of the 14 July 2000 meterwavelength

- dynamic radio spectrum compared with TRACE data // Sol. Phys. V. 204. C. 141–254. 2001.
- *Elgarøy Ø.* Observations of the fine structure of Enhanced solar radio radiation with a narrow-band spectrum analyser // Nature. V. 184. P. 887–888. 1959.
<https://doi.org/10.1038/184887a0>
- *Iskov V.N., Chertok I.M., Chernov G.P., Fomichev V.V. et al.* Analysis of the flare of May 16, 1981 with a complex space-time structure using optical, X-ray and radio observations // Bull. Astr. Inst. Czechoslovakia. V. 36. P. 81–97. 1985.
- *Gary D.E., Dulk G.A., House L.L. et al.* The Type IV burst of 1980 June 29, 0233 UT: Harmonic plasma emission? // Astron. Astrophys. V. 52. P. 42–50. 1985.
- *Gopalswami N.* History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship // Geosci. Lett. V. 3. № 8. P. 1–18. 2016.
<https://doi.org/10.1186/s40562-016-0039-2>
- *Mann G., Baumgartel K., Chernov G.P., Karlicky M.* Interpretation of a special fine structure in type IV solar radio bursts // Sol. Phys. V. 120. P. 383–391. 1989.
- *Masuda S., Kosugi T., Hudson H.S.* // Sol. Phys. V. 204. P. 55–67. 2001.
<https://doi.org/10.1023/A:1014230629731>
- *Morosan D.E., Kilpua E.K.J., Carley E.P., Monstein C.* Variable emission mechanism of a Type IV radio burst // Astron. Astrophys. V. 623. № A63. P. 1–12. 2019.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834510>
- *Morosam P.E., Kumari A., Kilpua E.K.J., Hamini A.* Moving solar radio bursts and their association with coronal mass ejections // Astron. Astrophys. V. 647. № L12. P. 1–5. 2021.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140392>
- *Pick M., Forbes T.G., Mann G. et al.* Multi-wavelength observations of CMEs and associated phenomena / Report of Working Group F. // Space Sci. Rev. V. 123. P. 341–382. 2006.
<https://doi.org/10.1007/s11214-006-9021-1>
- *Pick M., Vilmer N.* Sixty-five years of solar radioastronomy: flares, coronal mass ejections and Sun–Earth connection // Astron. Astrophys. Rev. V. 16. P. 1–153. 2008.
<https://doi.org/10.1007/s00159-008-0013-x>
- *Ramesh R., Kishore P., Mulay Sargam M. et al.* Low-frequency observations of drifting, non-thermal continuum radio emission associated with the solar coronal mass ejections // The Astrophys. J. V. 778:30. P. 1–8. 2013.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/778/1/30>
- *Reiner M.J., Kaiser M.L., Karlicky M. et al.* Bastille day event: a radio perspective // Sol. Phys. V. 204. P. 123–139. 2001.
- *Riddle A.C.* 80 MHz observations of a moving type IV solar burst, March 1, 1969 // Sol. Phys. V. 13. P. 448–457. 1970.
- *Robinson R.D.* The relation between flare-related metric continuum bursts and coronal mass ejections // Sol. Phys. V. 104. P. 33–39. 1986.
- *Rosenberg H.* Evidence for mhd pulsations in the solar corona // Astron. Astrophys. V. 9. P. 159–162. 1970.
- *Trottet G., Kerdraon A., Benz A.O., Treumann R.A.* Quasi-periodic short-term modulations during a moving type IV burst // Astron. Astrophys. V. 93. P. 129–135. 1981.
- *Vršnak B., Warmuth A., Temmer M. et al.* Multi-wavelength study of coronal waves associated with the CME-flare event of 3 November 2003 // Astron. Astrophys. V. 448. P. 739–752. 2006.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053740>
- *Wang S.J., Yan Y.H., Zhao R.Z., Fu Q.J. et al.* Broadband radio bursts and the structures during the great solar event on 14 July 2000 // Sol. Phys. V. 204. P. 155–166. 2001.
- *Wild J.P.* The radioherliograph and the radio astronomy programme of the Culgoora Observatory // Proc. Astron. Soc. Australia. V. 1. P. 28–30. 1967.
- *Zaitsev V.V., Stepanov A.B., Chernov G.P.* Pulsations of the type IV radio bursts as an indicator of protonability of solar flare // Sol. Phys. V. 93. P. 363–377. 1984.
- *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.* Cyclotron wave instability in the corona and origin of solar radio emission with fine structure. III. Origin of zebra pattern // Sol. Phys. V. 44. P. 461–470. 1975.