

УДК 523.985

МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ ЗЕБРА-СТРУКТУР В СОЛНЕЧНОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИИ НА ФОНЕ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

© 2025 г. Г. П. Чернов^{1,*}, В. В. Фомичев^{1,**}

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

*e-mail: gchernov@izmiran.ru

** e-mail: fomichev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 01.05.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Дискуссия о происхождении зебра-структуры продолжается более 50 лет. Во многих работах обычно постулируется, что механизм двойного плазменного резонанса всегда работает, если в магнитной ловушке есть быстрые частицы. По причине ряда трудностей, с которыми сталкивается этот механизм, стали появляться работы по его усовершенствованию, в основном в десятке статей Карлицкого и Яснова, где все обсуждение основывается на изменчивости отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности и допуском некой турбулентности плазмы в источнике. Здесь мы показываем возможности альтернативной модели взаимодействия плазменных волн с вистлерами. Было отобрано несколько явлений, в которых ясно, что отношение масштабов изменения не меняется в магнитной петле как источнике зебра-структуры. Было показано, что все основные детали спорадической зебра-структуры в явлении 1 августа 2010 г. (и во многих других явлениях) удастся объяснить в рамках единой модели зебра-структуры и радиоволокон (fiber bursts) при взаимодействии плазменных волн с вистлерами. Основные изменения полос зебра-структуры вызываются за счет рассеяния быстрых частиц на вистлерах, приводящих к переключению неустойчивости вистлеров с нормального эффекта Доплера на аномальный. В конце рассматриваются возможности лабораторных экспериментов и сравнивается солнечная зебра-структура с подобными полосами в декаметровом радиоизлучении Юпитера.

Ключевые слова: вспышки, радиовсплески, тонкая структура, зебра-структура, радиоволокна

DOI: 10.31857/S0016794025010028, **EDN:** AFFCCD

1. ВВЕДЕНИЕ

Понимание природы тонкой структуры радиоизлучения солнечных радиовсплесков является одним из важнейших критериев проверки механизмов радиоизлучения. Зебра-структура (ЗС) принадлежит к наиболее примечательному виду тонкой структуры. На динамических спектрах она появляется в виде регулярных полос в излучении и поглощении. Она описана во множестве статей и монографий, начиная с первой публикации Элгароя [Elgarøy, 1959; Kuijpers, 1975; Slottje, 1981; Chernov, 1976; 2006; 2011].

Дискуссия о происхождении зебра-структуры продолжается более 50 лет [Chernov, 2011]. Чаше всего обсуждается механизм, основанный на

двойном плазменном резонансе (ДПР) [Zheleznykov and Zlotnik, 1975a, b]:

$$\omega_{UH} = \left(\omega_{Pe}^2 + \omega_{Be}^2 \right)^{1/2} = s\omega_{Be}, \quad (1)$$

где ω_{Pe} — электронная плазменная частота, ω_{Be} — электронная гирочастота в условиях, когда $\omega_{Be} \ll \omega_{Pe}$ [Zheleznykov and Zlotnik, 1975a, b; Kuijpers, 1975, 1980; Mollwo, 1983, 1988; Winglee and Dulk, 1986]. В этих работах обычно постулируется, что механизм всегда работает, если в магнитной ловушке есть быстрые частицы. Однако он сталкивается с рядом трудностей при объяснении динамики полос ЗС (резкое изменение частотного дрейфа полос, большое число гармоник, частотное расщепление полос, их сверхтонкая структура в виде

миллисекундных спайков). Поэтому стали появляться работы как по его усовершенствованию [Karlický et al., 2001; LaBelle et al., 2003; Kuznetsov and Tsap, 2007], так и связанные с созданием новых моделей.

В десятке работ Карлицкого и Яснова в рамках ДПР совершенствовался метод оценки числа гармоник, в основном в сторону его увеличения, доводя его до 170–200. При этом никаких сравнений с другими моделями, как правило, не делалось.

Здесь мы отметим некоторые их важные результаты с привлечением их обсуждения в рамках альтернативной модели зебры на вистлерах.

2. СЛОЖНЫЕ СПЕКТРЫ ЗЕБРА-СТРУКТУРЫ

На рис. 1 и рис. 2 приведены спектры зебра-структуры с различными параметрами полос как со временем, так и на разных частотах. Здесь трудно оправдать применение механизма на ДПР даже для отдельных участков спектра, игнорируя прочие.

Почти одновременно с ДПР был предложен альтернативный механизм взаимодействия плазменных волн (I) с вистлерами (w), $I + w \rightarrow t$ [Chernov, 1976, 1990]. В этой модели перечисленные выше тонкие эффекты полос ЗС объясняются квазилинейными эффектами взаимодействия быстрых частиц с вистлерами. Механизм с вистлерами стал его естественным развитием после его применения Койперсом [Kuijpers, 1975] для волокон (fiber bursts), когда в некоторых явлениях наблюдался непрерывный переход полос ЗС в волокна и обратно. Самые важные детали этого механизма представлены в разделе Обсуждение.

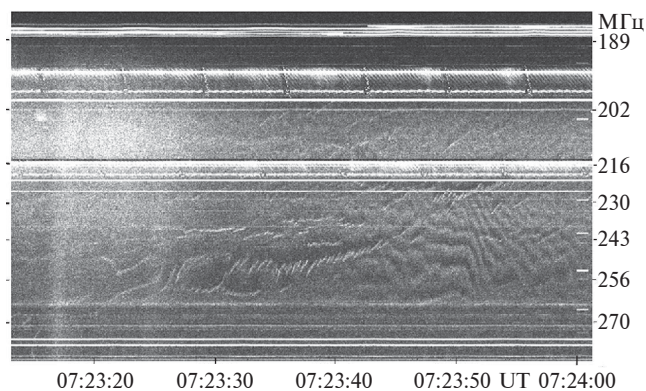


Рис. 1. Сложная зебра-структура по данным спектрографа ИЗМИРАН в диапазоне 180–270 МГц в явлении 18.07.2000 г.

В основополагающей работе по механизму ДПР [Zheleznykov and Zlotnik, 1975a] было показано, что относительная ширина полосы инкремента в гибридной полосе оказывается невероятно узкой $\delta\omega/\omega_{Be} \sim 2.5 \cdot 10^{-4}$. Такая величина получается только при условии, что дисперсия скоростей пучка частиц при оценках вообще отбрасывается как бесконечно малая величина. В работе [Benáček et al., 2017] показано, что учет дисперсии скоростей горячих частиц и температуры холодной плазмы сильно ограничивают эффективность механизма ДПР. Затем Карлицкий и Яснов внесли большой вклад в совершенствование механизма на ДПР в десятке своих работ. В одной из недавних работ [Yasnov and Karlický, 2020] сделали важное обновление в этой деятельности. После статьи [Yasnov and Chernov, 2020] они указали на важность при анализе любого явления учета изменения отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности в источнике зебра-структуры. Например, в работе [Yasnov and Chernov, 2020] это отношение считалось постоянным и было показано преимущество механизма с вистлерами для явления 21.06.2011 г.

Во введении работы [Yasnov and Karlický, 2020] авторы отметили все основные работы по наблюдениям зебра-структуры и теоретическим механизмам для ее объяснения (более 20 статей), что избавляет нас от необходимости повторять их здесь. Они предложили улучшенный метод для определения гирогармоники зебра полос, что

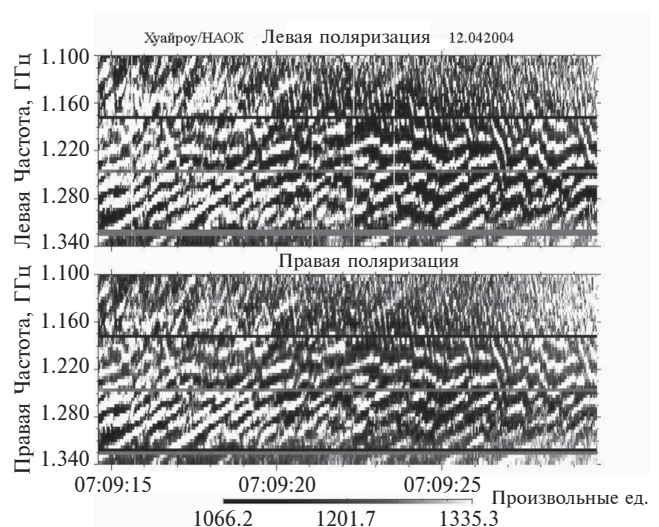


Рис. 2. Сложное событие 01.12.2004 г. с плавным переходом волокон (fiber bursts) в полосы зебра-структуры с пилообразным частотным дрейфом в диапазоне 1.1–1.34 ГГц (ст. Huiyou, Национальной Астрономической Обсерватории Китая (НАОК)) в явлении 01.12.2004 г.

является существенным для определения электронной плотности и напряженности магнитного поля в источнике зебры. В сравнении с прежними методами сделано новое допущение, что отношение $R = L_{bh}/L_{nh}$ (где L_{bh} и L_{nh} – характерные масштабы изменения магнитного поля и плотности) меняются в источнике в более обобщенной форме. Почти свободное манипулирование изменчивости R позволяет получить для явления 21.06.2011 г. новые значения номеров гирочастоты около 115 (вместо 50–60 в работе [Yasnov and Chernov, 2020]), а в других явлениях до 170. При этом не упоминаются предыдущие результаты авторов [Benáček et al., 2017], где показано, что в реальных параметрах амплитуда инкремента конусной неустойчивости существенно падает к 30 гармонике.

Один этот факт свидетельствует о непригодности предлагаемого улучшения модели на ДПР, в частности, для определения номера гармоники полос зебра-структуры, манипулируя непостоянством отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности как в одном явлении, так и в разных.

В предыдущей работе [Karlický, 2014] полагалось, что все частотные вариации полос зебры вызываются некой турбулентностью. В последних статьях все связывается с распространением быстрой магнитозвуковой волны [Karlický, 2022], поскольку там был определен строгий период флуктуаций, совпадающей с классической косинусной функцией. Интересно, что в очередной раз анализируется явление 17 августа 1998 г., после первого рассмотрения в работе [Zlotnik et al., 2009]. Это быстрые пульсации пакетов зебра-структуры (похожих на всплески III типа) на фоне пульсаций в поглощении. [Zlotnik et al., 2009] полагали, что в источнике присутствовали две неравновесные функции распределения: одна с конусным распределением по скоростям, ответственная за излучение континуума, и другая типа Dory, Guest, and Harris, способная вызывать эффект ДПР, вызывая зебра-структуру. [Karlický, 2022] не упоминает об этом. Предполагается работа механизма ДПР и определяется номер гармоники на нижней частоте по разработанному новому методу (упомянутому выше) для 13 моментов зебры на разных частотах от 254 до 287 МГц. Максимальные номера гармоник получены на частоте 270.6 МГц, $s_1 = 177.6$ и на 268.6 МГц $s_1 = 214.6$.

Такие большие маловероятные гармоники стимулируют напомнить об альтернативной интерпретации этого явления. В обзоре [Chernov, 2019] отмечаются некоторые свойства на спектре

с пакетами ЗС, которые нигде не рассматривались, начиная с работы [Zlotnik et al., 2009]. Не все пакеты ЗС имеют отрицательный частотный дрейф (как у всплесков III типа). Можно видеть ряд моментов с положительным дрейфом. ЗС видна и между пакетами, и можно видеть непрерывные полосы зебры на протяжении пяти пакетов с заметным пилообразным частотным дрейфом. Между пакетами ЗС пульсации в поглощении имеют разнообразный частотный дрейф.

Подобные спектры с почти вертикальными пакетами зебры, наблюдались во многих явлениях, начиная с отличного примера на рис. 6 в работе [Slottje, 1972]. В явлении 03 июля 1974 г. подобные пакеты зебры появлялись на протяжении нескольких часов [Slottje, 1972; Chernov, 1976]. Ранее мы уже показали преимущество модели с вистлерами для интерпретации явления 21.06.2011 г. [Yasnov and Chernov, 2020]. Еще ранее для объяснения пилообразного частотного дрейфа полос зебры в известном явлении 25.10.1994 г. применялся механизм с вистлерами на основе рассеяния быстрых частиц на вистлерах [Chernov, 2005]. Вистлеры всегда генерируются одновременно с плазменными волнами на верхней гибридной частоте быстрыми частицами с конусным распределением по скоростям. Процесс рассеяния на вистлерах был использован в работе [Chernov, 1990] и более подробно в работах [Chernov, 1996, 2005]. Там рассмотрено важное свойство процесса: изменение направления частотного дрейфа полос зебры должно коррелировать с изменением направления пространственного дрейфа их источников радиоизлучения (см. рис. 2 в [Chernov, 2019]).

При рассеянии быстрых частиц на вистлерах функция распределения меняется, генерация вистлеров может многократно переключаться с нормального эффекта Доплера на аномальный. В работе [Zlotnik et al., 2003] для явления 25.10.1994 г. используется барометрическая формула для определения температуры и выбора магнитной петли. Однако распределение концентрации по барометрической формуле нельзя применять в магнитных петлях с плазменным $\beta \ll 1$, поскольку эта формула дает распределение плотности в поле силы тяжести при постоянной температуре и без учета магнитного поля.

При рассеянии быстрых частиц на вистлерах функция распределения меняется, генерация вистлеров может многократно переключаться с нормального эффекта Доплера на аномальный (веерная неустойчивость).

Если быстрые частицы взаимодействуют с вистлерами на циклотронном резонансе

$$\omega^w - k_{\parallel} v_{\parallel} - s\omega_{Be} = 0 \quad (2)$$

(на нормальном доплеровском резонансе $s = +1$), волны и частицы противоположно направлены ($k_{\parallel} < 0$ или $\omega/k_{\parallel} < 0$) (k_{\parallel} и v_{\parallel} — компоненты волнового вектора и скорости параллельные магнитному полю), частицы движутся вдоль диффузионных кривых. Когда максимум функции распределения смещается в сторону больших v_{\parallel} , включается аномальный эффект Доплера ($s = -1$ в (1)). В этих случаях групповая скорость вистлеров меняет знак на обратный (плавно или резко в зависимости от параметров быстрых частиц). И в результате частотный дрейф полос синхронно меняется на обратный (детальнее см. в [Chernov, 1996]).

Карлицкий и Яснот обычно анализируют явления с регулярными полосами зебры, но чаще спектры бывают очень сложными с наложением не только быстрых пульсаций, но с волокнами (fiber bursts) с разным частотным дрейфом, которые иногда трудно отличить от ЗС (например, как на рис. 1 и 2).

Все обсуждение основано на изменчивости отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности. Уже это указывает на сложности для модели на ДПР. По спектрам ряда явлений становится ясно, что отношение масштабов изменения поля и плотности не может мгновенно меняться в петле.

Причем, они используют ряд известных явлений с большим числом полос, не касаясь многих других эффектов на том же спектре. Например,

игнорируя объяснения пилообразного частотного спектра полос, связь с быстрыми пульсациями, резкие переходы, скачки параметров полос на тех же частотах и прочие моменты.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Применение механизма ДПР просто постулируется. После большого обзора [Zheleznyakov et al., 2016] сейчас нет необходимости детально повторять его описание. Он остается самым цитируемым при анализе зебра-структуры. Он основан на генерации плазменных волн на верхней гибридной частоте ω_{UH} быстрыми электронами с функцией распределения по скоростям с конусом потерь. Последующая их трансформация в электромагнитные волны создает континуальное излучение, которое может резко усиливаться на уровнях ДПР, где ω_{UH} примерно равна целому числу s электронных циклотронных гармоник ($\approx s\omega_{Be}$). Это простое алгебраическое соотношение лежит в основе красивой теории зебра-структуры (ставшей почти классической), представленной в работах [Zheleznyakov and Zlotnik, 1975a, b] и поддержанной затем в работе [Winglee and Dulk, 1986].

Основное условие существования многих уровней ДПР предполагает, что масштаб изменения магнитного поля должен быть много меньше масштаба изменения плотности. Однако это условие показано в перечисленных работах в виде гипотетической схемы без цифровых шкал по осям, показанной на рис. 3а как фрагмент рис. 2 в обзоре [Zheleznyakov et al., 2016].

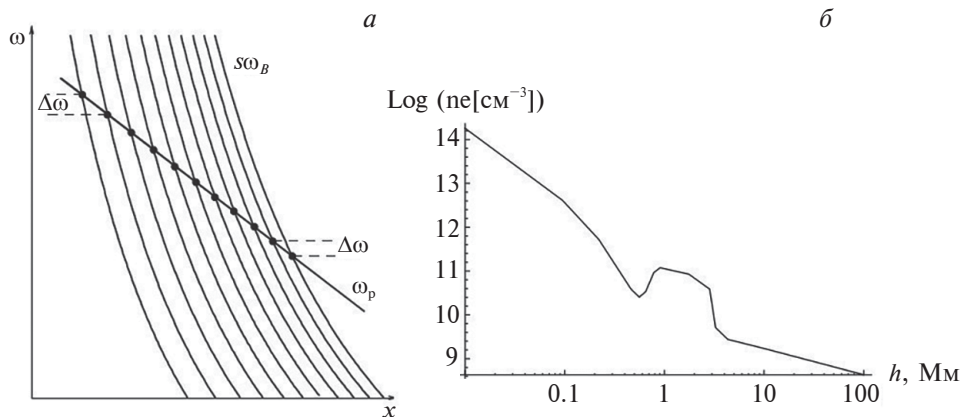


Рис. 3. (а) Гармоники циклотронной частоты $s\omega_{Be}$ и плазменной частоты ω_p как функции от координаты x для характерных масштабов изменения магнитного поля LB и плотности LN при $|LB| < |LN|$ (фрагмент рис. 2 из [Zheleznyakov et al., 2016]); (б) Профиль электронной плотности в зависимости от высоты h в солнечной атмосфере согласно [Selhorst et al., 2008].

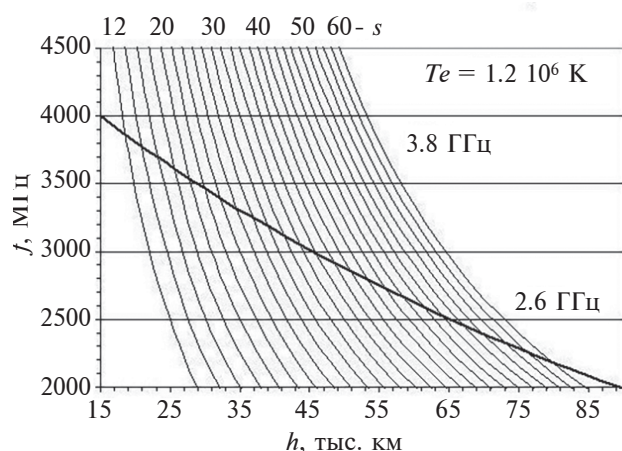


Рис. 4. Высотная зависимость плазменной частоты в соответствии с барометрическим законом (жирная линия) и высотные профили электронных циклотронных гармоник s (тонкие линии) в солнечной короне. Для температуры электронов $T_e = 1.2 \cdot 10^6$ К и начальной частоты $f_{p0} = 3800$ МГц на высоте $h_{p0} = 20\,000$ км, 34 уровня ДПР формируются в короне между плазменными уровнями 2600–3800 МГц (из [Lapuhov and Chernov, 2009]).

Если же мы попытаемся использовать для этого известные аналитические выражения для зависимости плотности и магнитного поля в короне, то никакие известные модели не подтверждают возможности образования многих уровней ДПР в разумных размерах источников зебра-структуры. Для наглядности см. рис. 6 и 7 в книге [Chernov, 2019] на стр. 217, вызывающие сомнения вообще в использовании модели на ДПР для объяснения многочисленных полос зебры, даже не обращая внимания на многие эффекты сложной динамики полос.

На рис. 4 приведен расчет уровней ДПР с использованием обычных (общепринятых) параметров корональной плазмы по барометрической формуле: электронная температура $T_e = 1.2 \cdot 10^6$ К, начальная плазменная частота $f_{p0} = 3800$ МГц на высоте $h_{p0} = 20\,000$ км. Если для циклотронных гармоник использовать дипольную зависимость магнитного поля, то гармоники с $s \geq 50$ уходят на гораздо большие высоты $\geq 100\,000$ км. Таким образом, возбуждение волн одновременно на 34 уровнях ДПР в короне неосуществимо в любых реальных моделях плотности и магнитного поля. В последних работах Карлицкий и Яснот предложили экзотическую модель (рис. 3б) с горбом на плавном спаде плотности [Selhorst et al., 2008], на крутых склонах которого должны вы-

полняться условия ДПР для генерации большого числа гармоник [Yasnov et al., 2016].

На рис. 1 показан спектр длительностью около 45 с со сложной зебра-структурой, но при отсутствии регулярных полос трудно найти момент, где можно было бы применить механизм на ДПР. В зебра-структуру вклинивается широкая полоса в поглощении, на фоне которой развивается цепочка узкополосных (rope-like) волокон [Chernov, 1997, 2008; Chernov et al., 2007].

На рис. 2 структура полос кардинально меняется за 15 с волокна (похожие на fiber bursts), плавно переходят в полосы зебры с волнообразным частотным дрейфом. Очевидно, что отношение масштабов изменения поля и плотности не может заметно меняться за несколько секунд.

Спектры зебры с пилообразным частотным дрейфом полос рассматривались в работе [Karlický, 2014] на примере спектров обс. Ondřejov в дециметровом диапазоне в явления 01.08.2010 г. Не вдаваясь в детали, отметим, что целью работы было показать, что в рамках модели на ДПР источник зебра-структуры находится в турбулентном состоянии на основе анализа Фурье временных профилей интенсивности полос с частотой (а из соотношений $\omega_{UH} \approx \omega_{pe}$ и $n_e \approx \omega_{pe}^2$ и с плотностью плазмы). Профиль колебаний Фурье плотности принимается как расчетный профиль полосы зебры (видимо, полагая, что это не требует доказательств). Спектр мощности колебаний имеет степенной вид с индексом $-5/3$, совпадающий с колмогоровским спектром для турбулентности.

Независимо от этой работы в статье [Chernov et al., 2018] было показано, что все основные детали спорадической зебра-структуры в явлении 1 августа 2010 г. удастся объяснить в рамках единой модели зебра-структуры и радиоволокон при взаимодействии плазменных волн с вистлерами (без сильной турбулентности плазмы в источнике). Основные изменения полос зебра-структуры вызываются за счет рассеяния быстрых частиц на вистлерах, приводящих к переключению неустойчивости вистлеров с нормального эффекта Доплера на аномальный.

3.1. Моделирование полос ЗС

В связи с замечанием выше о невозможности получения многих уровней ДПР ни в каких известных моделях плотности и магнитного поля (см. рис. 4) можно отметить работу [Karlický, 2022] по моделированию солнечной радио зебры. Фактически, это не моделирование (simulation), а подгонка параметров плазмы в источнике, что-

бы получить модельные точки на полосе зебры на спектре, совпадающие с наблюдаемыми, без расчета генерации излучения в рамках механизма на ДПР, просто строится график типа рис. 4. При этом основной вывод в конце подтверждает наш вывод (без ссылки), поскольку выбранные величины поля не совпадают ни с какими известными моделями. Есть и деловой вывод в конце: необходимо продолжить расчеты инкрементов верхних гибридных волн для больших номеров гармоник (в статье $s = 120-124$).

На спектре рис. 2 в его начале виден плавный переход волокон (fiber bursts) в полосы зебры с пилообразным частотным дрейфом. Такой же переход или обратный наблюдался в явлении 01.08.2010 г. Карлицкий [Karlický, 2014] не обсуждает этого эффекта, что, вероятно, связано с тем, что ранее в работе [Karlický, 2013] модель возбуждения волокон на вистлерах [Kuijpers, 1975] отвергается и предлагается новая, или подправленная модель [Treumann et al., 1990], основанная на альвеновских солитонах.

3.2. Взрывная неустойчивость

Предлагаемый в работе [Fomichev et al., 2009] механизм, основанный на стабилизации взрывной неустойчивости при каскадном нарастании ионнозвуковых гармоник, оказывается значительно эффективнее механизма неустойчивости вистлеров на гармониках ионного звука. Он обе-

спечивает большое число гармоник ЗС с частотным разделением, не зависящим от соотношения плазменной и циклотронной частот в источнике и растущим с частотой (в соответствии с наблюдениями). При этом не выдвигается никаких дополнительных жестких условий. Остается прежнее условие ускорения моноскоростных пучков слабoreлятивистских частиц, которое обычно реализуется в любой крупной вспышке.

3.3. Лабораторные эксперименты ([Viktorov et al., 2015])

Для подтверждения эффективности механизма ДПР иногда ссылаются на, возможно, единственную работу по созданию излучения на ДПР в лабораторном плазменном эксперименте [Viktorov et al., 2015]. Хотя сейчас ссылки на нее постепенно затихают [Chernov, 2019], поскольку там демонстрируются неоднозначные результаты (согласно рис. 5): излучение зафиксировано только в виде сложных полос на второй гармонике циклотронной частоты, а эксперимент демонстрировал и третью гармонику (на рис. 2). И если бы это так просто смоделировать, то можно было бы ожидать многократного повторения эксперимента, что и было бы действительно доказательством работы механизма. Однако на слуху были лишь заверения авторов, что они стремятся получить излучение на третьей гармонике.

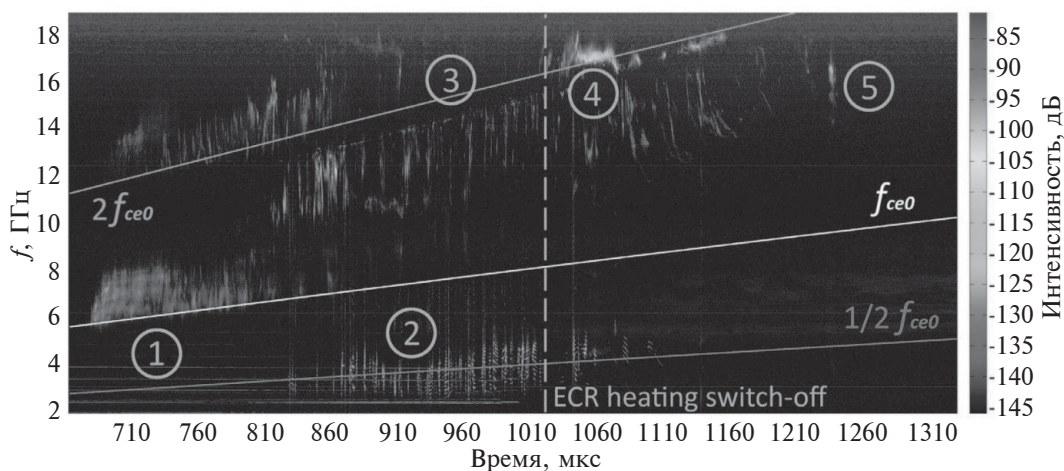


Рис. 5. Динамический спектр излучения плазмы. Выделены типы кинетических неустойчивостей, рассматриваемых в работе: 1) начальная стадия ЭСР-разряда (разреженная плазма); 2) и 3) стадии развитого разряда (плотная плазма); 4) начальная фаза распада плазмы (плотная плазма); 5) распадающаяся плазма (разреженная плазма). Три линии на спектрограмме показывают изменение во времени соответствующих частот $2f_{ce0}$, f_{ce0} и $1/2f_{ce0}$, где $f_{ce0} \equiv f_{ce}$ — электронная циклотронная частота в центре магнитной ловушки на ее оси. ECR heating switch-off — выключение нагрева электронного циклотронного резонанса. Отметим строгую периодичность генерации вистлеров. Фрагмент рис.2 из [Viktorov et al., 2015].

Примечательно, что Viktorov et al. [2015] показывают в своем эксперименте одновременную генерацию вистлеров на частоте вблизи $0.5f_{ce}$ на рис. 3b и полосы сложной формы вблизи частоты $2f_{ce}$ на рис. с и d, но авторы не включали эти факты в тему своей работы.

3.4. Зебра-структура в декаметровом радиоизлучении Юпитера ([Panchenko et al., 2018])

Наблюдения ЗС, аналогичной в солнечном радиоизлучении, были проведены на большом наземном радиотелескопе УРАН-2 (Полтава, Украина) [Litvinenko et al., 2016]. Полосы ЗС (см. рис. 6) представляют собой сильно поляризованное радиоизлучение с длительностью от 20 до 290 с с плотностью потока $\sim 105\text{--}106$ Ян (нормированной на 1 а.е.), то есть на 1–2 порядка ниже, чем для декаметрового радиоизлучения ее луны Ио. Частотное расщепление между полосами незначительно увеличивается с ростом частоты излучения (в 43 событиях), обычно в пределах 0.5–1.5 МГц. Во всех примерах полосы демонстрируют быстрый волнообразный дрейф частоты, оставаясь квазидистантными друг к другу. Все эти факты аналогичны солнечной ЗС.

В отличие от солнечной короны, плазма Юпитера сильно анизотропна, то есть $f_{pe} \ll f_{ce}$, в большинстве областей магнитосферы. Поэтому механизм ДПР с электронами не может объяснить наши наблюдения, так как для этого требуется чрезвычайно высокая плотность плазмы, что очень маловероятно в магнитосфере Юпитера. [Zlotnik et al., 2016] предложили альтернативный механизм формирования структуры зебры в километровом излучении Юпитера. Модель основана на ДПР на ионных циклотронных гармониках. Механизм включает возбуждение ионных циклотронных волн на нижней гибридной частоте (f_{LH}), а затем нелинейное преобразование этого низкочастотного излучения в вы-

сокочастотную волну за счет процесса слияния с высокочастотной модой.

ДПР с ионами может работать в областях, где $f_{pe} \ll f_{ce}$, что выполняется в большинстве областей магнитосферы Юпитера. Поэтому эффект ДПР на ионных циклотронных гармониках может быть реализован при гораздо меньшей плотности плазмы, чем эффект ДПР на электронных циклотронных гармониках. В этом случае, $f_{LH} \approx f_{pi}$ (f_{pi} — частота ионной плазмы), а условием резонанса является $f_{LH} = sf_{ci}$. Низкочастотные плазменные волны не могут выйти из источника и должны сначала быть преобразованы в высокочастотные электромагнитные волны (f_{em}) в процессе нелинейного слияния с высокочастотной модой (например, с плазменными волнами на верхней гибридной частоте). Слияние этих волн ($f_{em} = sf_{ci} + f_{ce}$) приводит к генерации электромагнитных волн со спектром в виде ЗС. Тем не менее, необходимы дополнительные теоретические исследования для уточнения нелинейной конверсии мод из низкочастотных ионных циклотронных волн в высокочастотные электромагнитные волны.

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Краткий обзор возможных альтернативных механизмов возбуждения зебра-структуры в связи с отмеченными во Введении трудностями механизма ДПР показывает, что возможными моделями для одновременного возбуждения многих полос зебры могут служить механизм с вистлерами и взрывная неустойчивость (рассеяние нелинейных ионно-звуковых волн на частицах). Они не требуют никаких дополнительных условий (или ограничений) на параметры плазмы.

Радиоисточники волокон (fiber bursts) и ЗС в модели с вистлерами должны иметь движущиеся источники, а пространственный дрейф полос ЗС должен синхронно изменяться с изменением частотного дрейфа на динамическом

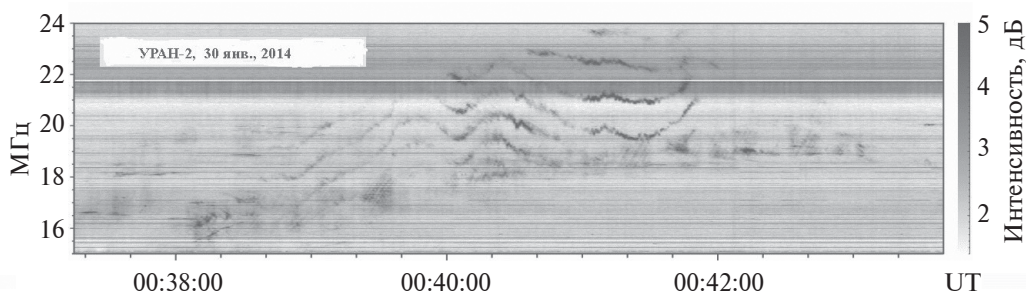


Рис. 6. Пример ЗС в радиоизлучении Юпитера, наблюдавшейся на украинском радиотелескопе УРАН-2, 30 января 2014 г. Фрагмент рис. 1 из работы [Panchenko et al., 2018].

спектре. В модели ДПР источник ЗС должен быть скорее стационарным.

Есть более разработанные теории, но окончательного решения по ним нет. Например, распространение через среду с неоднородностями предполагает их наличие с определенными масштабами [Lapuhov and Chernov, 2006, 2009]. Требуется еще более детальный анализ зебры в радиоизлучении Юпитера.

Мировая сеть радиотелескопов CALLISTO пока не позволяет использовать ее спектры, почти 90% их подвержены местным помехам (interferences), а низкое частотное разрешение чистых спектров не позволяет регистрировать полосы ЗС.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Benáček J., Karlický M., Yasnov L.V. Temperature dependent growth rates of the upper-hybrid waves and solar radio zebra patterns // *Astron. Astrophys.* V. 598. ID A108. 2017. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629395>
- Chernov G.P. Microstructure in the continuous radiation of type IV meter bursts. Modulation of continuous emission by wave packets of whistlers // *Sov. Astron.* V. 20. № 5. P. 582–589. 1976.
- Chernov G.P. Whistlers in the solar corona and their relevance to fine structures of type IV radio emission // *Sol. Phys.* V. 130. № 1–2. P. 75–82. 1990. <https://doi.org/10.1007/BF00156780>
- Chernov G.P. A manifestation of quasilinear diffusion in whistlers in the fine structure of type IV solar radio bursts // *Astron. Rep.* V. 40. № 4. P. 561–568. 1996.
- Chernov G.P. The relationship between fine structure of the solar radio emission at meter wavelengths and coronal transients // *Astron. Lett.* V. 23. № 6. P. 827–837. 1997.
- Chernov G.P. Solar radio burst with drifting stripes in emission and absorption // *Space Sci. Rev.* V. 127. № 1–4. P. 195–326. 2006. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9141-7>
- Chernov G.P., Stanislavsky A.A., Konvalenko A.A., Abranin E.P., Dorovsky V.V., Rucker H.O. Fine structure of decametric type II radio bursts // *Astron. Lett.* V. 33. № 3. P. 192–202. 2007. <https://doi.org/10.1134/S1063773707030061>
- Chernov G.P. Manifestation of quasilinear diffusion on whistlers in the fine structure radio sources of solar radio bursts // *Plasma Phys. Rep.* V. 31. № 4. P. 314–324. 2005. <https://doi.org/10.1134/1.1904148>
- 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. № 7. P. 486–499. 2008. <https://doi.org/10.1134/S1063773708070074>
- Chernov G.P. Fine structure of solar radio bursts. Heidelberg: Springer, 282 p. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20015-1>
- Chernov G.P. Latest data on the fine structure in solar radio emission / LAMBERT Academic Publisher. Riga, Latvia, 284 p. 2019.
- Chernov G.P., Fomichev V.V., Sych R.A. A model of zebra patterns in solar radio emission // *Geomagn. Aeronomy.* V. 58. № 3. P. 394–406. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016793218030040>
- Elgarøy Ø. Observations of the fine structure of enhanced solar radio radiation with a narrow-band spectrum analyser // *Nature.* V. 184. № 4690. P. 887–888. 1959. <https://doi.org/10.1038/184887a0>
- Fomichev V.V., Fainstein S.M., Chernov G.P. A possible interpretation of the zebra pattern in solar radiation // *Plasma Phys. Rep.* V. 35. № 12. P. 1032–1035. 2009. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09120058>
- Karlický M., Bárta M., Jiříčka K., Meszárosová H., Sawant H.S., Fernandes F.C.R., Cecatto J.R. Radio bursts with rapid frequency variations – lace bursts // *Astron. Astrophys.* V. 375. № 2. P. 638–642. 2001. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010888>
- Karlický M. Radio continua modulated by waves: Zebra patterns in solar and pulsar radio spectra // *Astron. Astrophys.* V. 552. ID A90. 2013. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321356>
- Karlický M. Frequency variations of solar radio zebras and their power-law spectra // *Astron. Astrophys.* V. 561. ID A 34. 2014. <https://doi.org/10.1051/00046361/201322547>
- Karlický M. Simulations of the solar radio zebra // *Astron. Astrophys.* V. 661. ID A56. 2022. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142497>
- Kuijpers J. Collective wave-particle interactions in solar type IV radio sources. Ph.D. Thesis. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University. 72 p. 1975.
- Kuijpers J. Theory of type IV dm Bursts // *Symposium - International Astronomical Union.* V. 86. P. 341–361. 1980. <https://doi.org/10.1017/S0074180900037098>
- Kuznetsov A.A., Tsap Yu.T. Loss-cone instability and formation of zebra patterns in type IV solar radio bursts // *Sol. Phys.* V. 241. P. 127–148. 2007. <https://doi.org/10.1007/S11207-006-0351-7>
- LaBelle J., Treumann R.A., Yoon P.H., Karlický M. A model of zebra emission in solar type IV radio bursts // *Astrophys. J.* V. 593. № 2. P. 1195–11207. 2003. <https://doi.org/10.1086/376732>
- Lapuhov A.I., Chernov G.P. New mechanism for the formation of discrete stripes in the solar radio

- spectrum // *Plasma Phys. Rep.* V. 32. № 10. P. 866–871. 2006. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06100060>
- *Laptuhov A.I., Chernov G.P.* Concerning mechanisms for the zebra pattern formation in the solar radio emission // *Plasma Phys. Rep.* V. 35. № 2. P. 160–168. 2009. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09020081>
- *Litvinenko G.V., Shaposhnikov V.E., Konovalenko A.A., Zakharenko V.V., Panchenko M., Dorovsky V.V., Brazhenko A.I., Rucker H.O., Vinogradov V.V., Melnik V.N.* Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra // *Icarus*. V. 272. P. 80–87. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.02.039>
- *Mollwo L.* Interpretation of patterns of drifting zebra stripes // *Sol. Phys.* V. 83. № 2. P. 305–320. 1983. <https://doi.org/10.1007/BF00157482>
- *Mollwo L.* The magneto-hydrostatic field in the region of Zebra patterns in solar type-IV dm-bursts // *Sol. Phys.* V. 116. № 2. P. 323–348. 1988. <https://doi.org/10.1007/BF00157482>
- *Panchenko M., Rošker S., Rucker H.O. et al.* Zebra pattern in decametric radio emission of Jupiter // *Astron. Astrophys.* V. 610. ID A69. 2018. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731369>
- *Selhorst C.L., Silva-Válío A., Costa J.E.R.* Solar atmospheric model over a highly polarized 17 GHz active region // *Astron. Astrophys.* V. 488. № 3. P. 1079–1084. 2008. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079217>
- *Slottje C.* Peculiar absorption and emission microstructures in the type IV solar radio outburst of March 2, 1970 // *Sol. Phys.* V. 25. № 1. P. 210–231. 1972. <https://doi.org/10.1007/BF00155758>
- *Slottje C.* Atlas of fine structures of dynamics spectra of solar type IV-dm and some type II radio bursts. Utrecht, The Netherlands: Dwingeloo Observatory, 233 p. 1981.
- *Treumann R.A., Gudel M., Benz A.O.* Alfvén wave solitons and solar intermediate drift bursts // *Astron. Astrophys.* V. 236. № 1. P. 242–249. 1990.
- *Viktorov M., Mansfeld D., Golubev S.* Laboratory study of kinetic instabilities in a nonequilibrium mirror-confined plasma // *Europhys. Lett.* V. 109. № 6. ID 65002. 2015. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/109/65002>
- *Winglee R.M. and Dulk G.A.* The electron-cyclotron maser instability as a source of plasma emission // *Astrophys. J.* V. 307. P. 808–819. 1986. <https://doi.org/10.1086/164467>
- *Yasnov L.V., Chernov G.P.* Alternative models of zebra patterns in the event on June 21, 2011 // *Sol. Phys.* V. 295. № 2. ID 13. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-1585-5>
- *Yasnov L.V., Karlický M., Stupishin A.G.* Physical conditions in the source region of a zebra structure // *Sol. Phys.* V. 291. № 7. P. 2037–2047. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0952-8>
- *Yasnov L.V., Karlický M.* Magnetic field, electron density and their spatial scales in zebra pattern radio sources // *Sol. Phys.* V. 295. № 7. ID 96. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01652-w>
- *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.* Cyclotron wave instability in the corona and origin of solar radio emission with fine structure // *Sol. Phys.* V. 43. № 2. P. 431–451. 1975a. <https://doi.org/10.1007/BF00152366>
- *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. № 2. P. 461–470. 1975b. <https://doi.org/10.1007/BF00153225>
- *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E.* Double plasma resonance and its manifestations in radio astronomy // *Phys.-Usp.* V. 59. № 10. P. 997–1120. 2016. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.05.037813>
- *Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H., Mann G., Hofmann A.* Solar type IV burst spectral fine structures. II. Source model // *Astron. Astrophys.* V. 410. № 3. P. 1011–1022. 2003. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031250>
- *Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H., Mann G.A.* Special radio spectral fine structure used for plasma diagnostics in coronal magnetic traps // *Sol. Phys.* V. 255. № 2. P. 273–288. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11207-009-9327-8>
- *Zlotnik E.Y., Shaposhnikov V.E., Zaitsev V.V.* Interpretation of the zebra pattern in the Jovian kilometric radiation // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 121. № 6. P. 5307–5318. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA022655>

Generation Mechanisms of Zebra Structures in Solar Radio Emission on the Background of Complex Dynamic Spectra

G. P. Chernov^{1, *}, V. V. Fomichev^{1, **}

*¹N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN),
Moscow, Troitsk, Russia*

**e-mail: gchernov@izmiran.ru*

***e-mail: fomichev@izmiran.ru*

The discussion about the origin of the zebra structure has been going on for more than 50 years. In many papers it is usually postulated that the double plasma resonance mechanism always works if there are fast particles in the magnetic trap. Due to a number of difficulties encountered by this mechanism, works on its improvement began to appear, mainly in a dozen papers by Karlitsky and Yasnov, where the whole discussion is based on the variability of the ratio of the magnetic field and density height scales and the assumption of some plasma turbulence in the source. Here we show the possibilities of an alternative model of interaction of plasma waves with whistlers. Several phenomena were selected in which it is clear that the ratio of height scales does not change in the magnetic loop as the source of the zebra structure. It was shown that all the main details of the sporadic zebra structure in the phenomenon of 1 August 2010 (and in many other phenomena) can be explained within the framework of a unified model of zebra structure and radio fibers (fiber bursts) in the interaction of plasma waves with whistlers. The main changes in the zebra structure bands are caused by the scattering of fast particles on whistlers, leading to switching of the whistler instability from the normal Doppler effect to the anomalous one. In the end, the possibilities of laboratory experiments are considered and the solar zebra structure is compared with similar bands in the decametre radio emission of Jupiter.

Keywords: flares, radio-bursts, fine structure, zebra-pattern, fiber-bursts