

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

УДК 523.520.27

А. И. БРАЖЕНКО¹, В. Н. МЕЛЬНИК², А. В. ФРАНЦУЗЕНКО¹,
В. В. ДОРОВСКИЙ², Х. О. РУКЕР³, М. ПАНЧЕНКО³

¹ Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36014, Украина
E-mail: brazhai@gmail.com

² Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина

³ Институт космических исследований Австрийской академии наук,
Шмидльштрассе, 6, г. Грац, 8042, Австрия

О ГАРМОНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ КОМПОНЕНТОВ В ПАРАХ IIIb-III ВСПЛЕСКОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Анализируются свойства всплесков пар IIIb-III типа, наблюдавшихся на радиотелескопе УРАН-2 в диапазоне частот 16 ÷ 32 МГц. Наблюдения проводились в апреле, июне и сентябре 2011 г. Проанализированы длительность, скорость частотного дрейфа, отношение частот в один и тот же момент времени и степень поляризации всплесков пар IIIb-III типа. Взвешиваются все за и против их гармонической связи.

Ключевые слова: Солнце, радиоизлучение, декаметровый диапазон, всплески IIIb-III типа, длительность, частотный дрейф, поляризация, плазменный механизм генерации

1. Введение

Известно, что всплески III типа иногда встречаются в виде пар, связанных гармонически. Отношение их частот, зарегистрированных в один и тот же момент времени, составляет примерно 2:1 (согласно [1] это отношение изменяется в пределах от 1.6 до 2.0 со средним значением 1.8).

Всплески IIIb типа отличаются от обычных всплесков III типа тем, что имеют тонкую частотную структуру в виде узкополосных стриа-всплесков. Довольно часто они наблюдаются в парах с обычными всплесками III типа. Со времени первых наблюдений таких пар возник вопрос, связаны ли они гармонически или это последовательность двух компонентов одного всплеска – предвестника и самого всплеска III типа [2–5]. В пользу гармонической связи говорит их близкое к 2 мгновенное отношение частот. Однако существенное различие их длительностей, наличие тонкой струк-

туры в виде стриа-всплесков у всплесков IIIb типа и ее отсутствие у обычных всплесков III типа ставят под сомнение наличие такой связи в паре этих всплесков. Прояснить вопрос о гармонической связи в парах всплесков IIIb-III типа может их комплексное исследование, включающее изучение поляризационных характеристик. Излучения первой и второй гармоник имеют различную степень поляризации. У первой гармоники она высокая, а у второй – низкая. Измерения степени поляризации пары всплесков IIIb-III типа ранее выполнялись, но носили скорее оценочный характер. Они проводились либо с низкой точностью [4, 6], либо были единичными [7].

В представленной работе исследуются свойства пар всплесков IIIb-III типа на частотах 16 ÷ 32 МГц, наблюдавшихся на радиотелескопе УРАН-2 в апреле, июне и сентябре 2011 г. Мы анализируем отношение частот в один и тот же момент времени, длительность, скорость дрейфа и степень поляризации пар всплесков IIIb-III типа.

© А. И. Браженко, В. Н. Мельник, А. В. Французенко,
В. В. Доровский, Х. О. Рукер, М. Панченко, 2015

2. Наблюдения

Пары всплесков ШЬ-Ш типа наблюдались в апреле, июне и сентябре 2011 г. на радиотелескопе УРАН-2, который находится вблизи г. Полтавы [8, 9]. Антенная решетка радиотелескопа состоит из 512 кросс-диполей, расположенных под углом 45° к меридиану, и имеет площадь 28000 м^2 . Луч антенны на частоте 25 МГц имеет размеры $3.5^\circ \times 7^\circ$. Измерения проводились в полосе частот $8 \div 32 \text{ МГц}$ в апреле и сентябре и в полосе $16 \div 32 \text{ МГц}$ в июне с помощью цифрового широкополосного спектрометра DSPz [10] с частотным и временным разрешением 4 кГц и 100 мс соответственно.

В периоды наблюдений 1–7 апреля, 3–6 июня и 4–7 сентября 2011 г. на диске Солнца одновременно находилось несколько активных областей (рис. 1, а–в), поэтому связать активность в декаметровом диапазоне с какой-то определенной группой пятен затруднительно. Отметим, однако, что максимальное количество пар ШЬ-Ш всплесков в апреле наблюдалось во время, когда группы пятен NOAA 11183 и NOAA 11180 располагались в $30^\circ \div 50^\circ$ западнее центрального меридиана. Вероятно, во время июньских наблюдений активность в декаметровом диапазоне связана с прохождением по диску Солнца групп NOAA 11231 и NOAA 11232. Во время июньских наблюдений они поочередно находились на долготах $40^\circ \div 50^\circ$ в восточной части диска Солнца.

Буря всплесков ШЬ-Ш типа, наблюдавшаяся в сентябре, возможно, связана с активностью взаимодействующих групп NOAA 11283 и NOAA 11288. 5 сентября, когда регистрирова-

лось наибольшее количество пар ШЬ-Ш всплесков, последняя располагалась на гелиодолготе примерно 50° , а группа NOAA 11283 находилась вблизи центрального меридиана. Хотя в этот, предыдущие и последующие дни основная вспышечная активность наблюдалась в группах, расположенных вблизи западного лимба. В дни регистрации наибольшего количества всплесков ШЬ-Ш типа наблюдались мощные выбросы корональных масс (СМЕ). Но каких-либо их проявлений в виде всплесков II или IV типов в наших наблюдениях зарегистрировано не было. Хотя по крайней мере 5 июня мощный СМЕ произошел во время наблюдений на радиотелескопе УРАН-2. А 3 апреля и 5 сентября СМЕ происходили непосредственно перед началом сеансов наблюдений, и, казалось бы, эти выбросы должны были бы проявиться в виде всплесков обычно их сопровождающих. Однако солнечная активность в декаметровом диапазоне длин волн наблюдалась в виде бурь всплесков Ш типа и ШЬ типа и довольно большого числа пар ШЬ-Ш типа.

Мы проанализировали 143 пары всплесков ШЬ-Ш типа в апреле, 106 пар в июне и 56 пар в сентябре. Для анализа выбирались пары, в которых оба компонента отчетливо наблюдались по крайней мере в диапазоне частот $16 \div 32 \text{ МГц}$. Это требование заметно сократило количество пар всплесков – кандидатов для анализа, несмотря на высокую активность бурь ШЬ-Ш типа в декаметровом диапазоне в период трех сессий наблюдений. Излучение всех пар всплесков имело правую поляризацию. Эпизодически наблюдалось и левополяризованное излучение, но оно не анализировалось, так

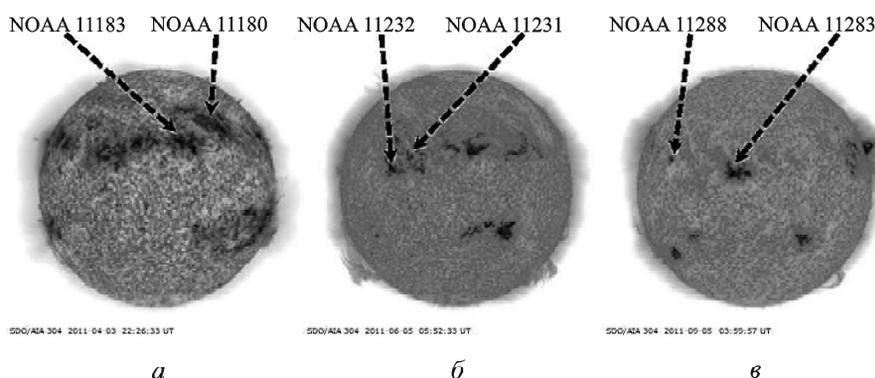


Рис. 1. Активные области на диске Солнца 3 апреля (а), 5 июня (б) и 5 сентября (в) 2011 г. (<http://sdo.gsfc.nasa.gov>.)

как, по-видимому, было сгенерировано в областях, отличных от тех, из которых выходило излучение с правой поляризацией. Динамические спектры некоторых пар всплесков IIIb-III типа, наблюдавшихся 3 апреля, 5 июня и 5 сентября 2011 г., приведены на рис. 2, а-в. Временные и поляризационные профили этих всплесков на частоте 23 МГц показаны на рис. 3.

Как видно на динамических спектрах, всплески IIIb типа состоят, как правило, не из одиночной “дорожки” стриа-всплесков. Часто стриа-всплески разнесены не только по частоте, но и по времени. Так что на одной частоте во всплесках IIIb могут наблюдаться и два, и более стриа-всплесков. Редко максимумы потоков излучения этих стриа-всплесков совпадают.

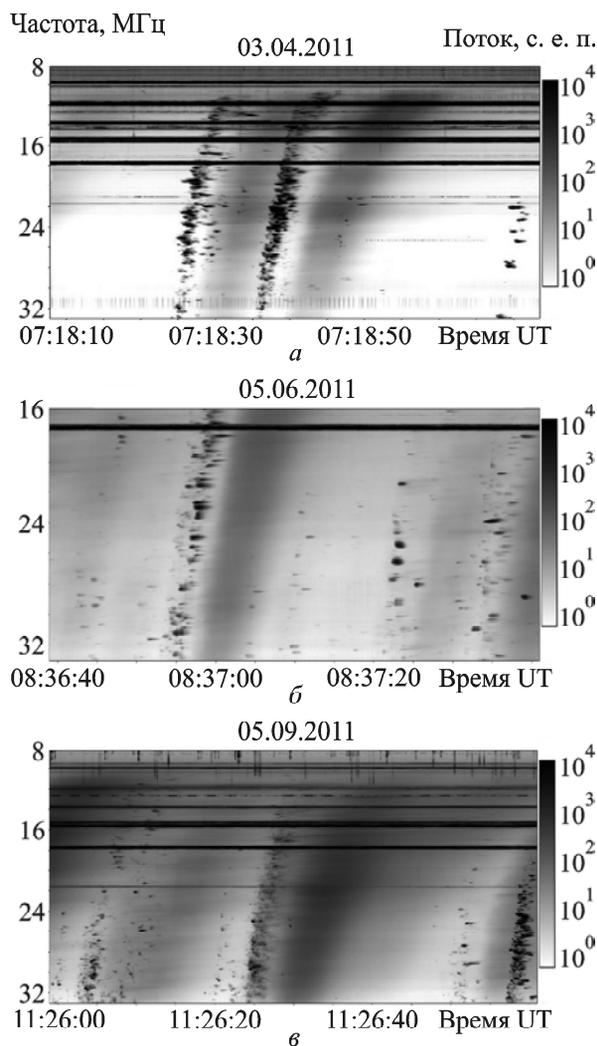


Рис. 2. Динамические спектры пар всплесков IIIb-III типа, наблюдавшихся 3 апреля (а), 5 июня (б) и 5 сентября (в) 2011 г.

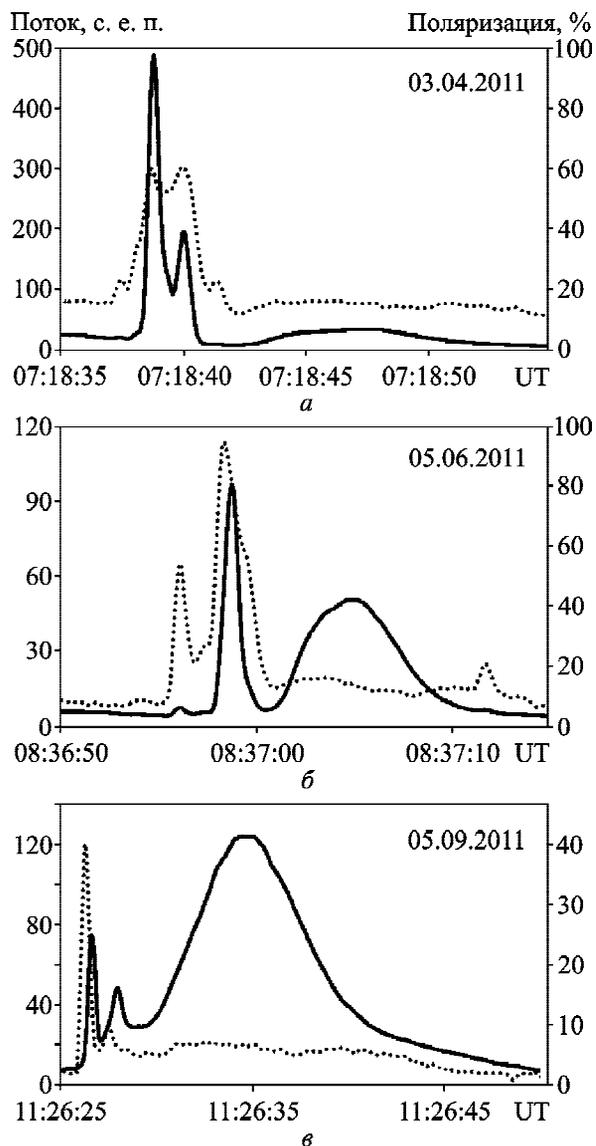


Рис. 3. Временные и поляризационные профили пар всплесков IIIb-III типа на частоте 23 МГц представленных соответственно на рис. 2: сплошная линия – поток излучения, пунктирная – степень поляризации

Чаще всего на данной частоте наблюдаются стриа с несовпадающими максимумами интенсивности. Кроме того, интенсивности различных стриа всплеска IIIb типа могут иметь весьма существенные различия. Отметим также, что корреляции между интенсивностью и поляризацией мы не обнаружили, как у всплесков типа IIIb, так и у всплесков III типа. Вышесказанное хорошо иллюстрирует рис. 3. В левой части каждого из рис. 3, а-в отчетливо видны два коротких стриа, имеющих высокую поляризацию, не связанную с потоком излучения,

а затем – продолжительный всплеск III типа с почти не изменяющейся поляризацией со значением менее 15 %. И здесь поляризация также не зависит от потока.

Измерение параметров пар всплесков IIIb-III проводилось на частотах 12, 16, 20, 24, 28 и 32 МГц в апреле и сентябре, а в июне – на частотах 16, 20, 24, 28 и 32 МГц. Для каждого всплеска в этих точках определялись: поток, длительность, скорость дрейфа между соседними анализируемыми частотами и степень круговой поляризации. Параметры пар всплесков IIIb-III типа, наблюдавшихся с временным интервалом в два месяца, а затем и три месяца, отличались незначительно, особенно параметры всплесков IIIb типа. Усредненные за все дни наблюдений значения параметров всплесков IIIb типа в апрельских, июньских и сентябрьских наблюдениях на всех частотах фактически совпали. В табл. 1 приведены средние значения параметров пар всплесков IIIb-III типа на частоте 16 МГц для трех сессий наблюдений.

Из таблицы видно, что в июне всплески были наиболее короткими, быстро дрейфующими и имели наиболее высокую степень поляризации первого компонента пары. Вместе с тем, несмотря на значительный разнос во времени наблюдений, параметры компонентов пар всплесков IIIb-III типа отличаются незначительно. Длительность и скорость частотного дрейфа как первого, так и второго компонента пар имеют типичные значения для декаметрового диапазона частот [3, 11]. Степень поляризации всплесков III типа практически не отличается и имеет значения, характерные для излучения второй гармоники местной плазменной частоты [12]. В то же время первый компонент пар – всплеск IIIb типа – имеет значительно большие значения степени поляризации, превышающие 30 %, что характерно для излучения основного тона

в предположении плазменного механизма излучения [13].

На рис. 4 приведены частотные зависимости скорости дрейфа, длительности и поляризации пар всплесков IIIb-III типа, наблюдавшихся 3 апреля, 5 июня и 5 сентября 2011 г. Скорость дрейфа растет с частотой у обоих компонентов пары всплесков IIIb-III типа (рис. 4, а и б). Рост скорости дрейфа с частотой у всплесков IIIb и всплесков III типа примерно одинаков. Скорость частотного дрейфа всплесков III типа в наших наблюдениях составила от 1.5 до 4.5 МГц/с. Всплески IIIb типа имели более высокую скорость частотного дрейфа, ее значения изменялись в интервале $1.5 \div 6$ МГц/с. Наименьшей скоростью частотного дрейфа была 5 сентября. В этот же день скорость дрейфа показала также меньшую скорость изменения с частотой и у всплесков III типа, и особенно у всплесков типа IIIb.

Видно убывание длительности всплесков III типа с частотой (рис. 4, в). Длительность этих всплесков на разных частотах в различные дни наблюдений имела значения от 5 до 15 с. В апреле всплески III типа на каждой из частот, кроме 16 МГц, были продолжительнее в среднем на 1.5 с. Длительности сентябрьских всплесков III типа были наименьшими, но их значения очень близки к значениям длительности всплесков III типа, наблюдавшимся 5 июня. Длительности всплесков IIIb типа медленнее уменьшались с частотой, а их значения, фактически одинаковые 3 апреля и 5 июня, изменялись в пределах $0.8 \div 2$ с (рис. 4, в). 5 сентября всплески IIIb типа были более продолжительными, их длительность была в среднем на 0.7 с больше чем в апреле и июне.

Средние значения степени поляризации всплесков III типа в парах всплесков IIIb-III типа в апреле, июне и сентябре на всех частотах фактически совпали и изменялись с частотой не-

Таблица 1. Параметры всплесков пар IIIb-III типа на частоте 16 МГц для трех сессий наблюдений

Параметры	Всплеск IIIb типа			Всплеск III типа		
	Апрель 2011 г.	Июнь 2011 г.	Сентябрь 2011 г.	Апрель 2011 г.	Июнь 2011 г.	Сентябрь 2011 г.
Длительность, с	2	1.2	1.9	11.7	8.6	9.4
Скорость частотного дрейфа, МГц/с	2.5	4.0	2.2	1.9	2.4	1.5
Степень поляризации, %	50.3	59.6	31.8	11.4	11.1	12.2

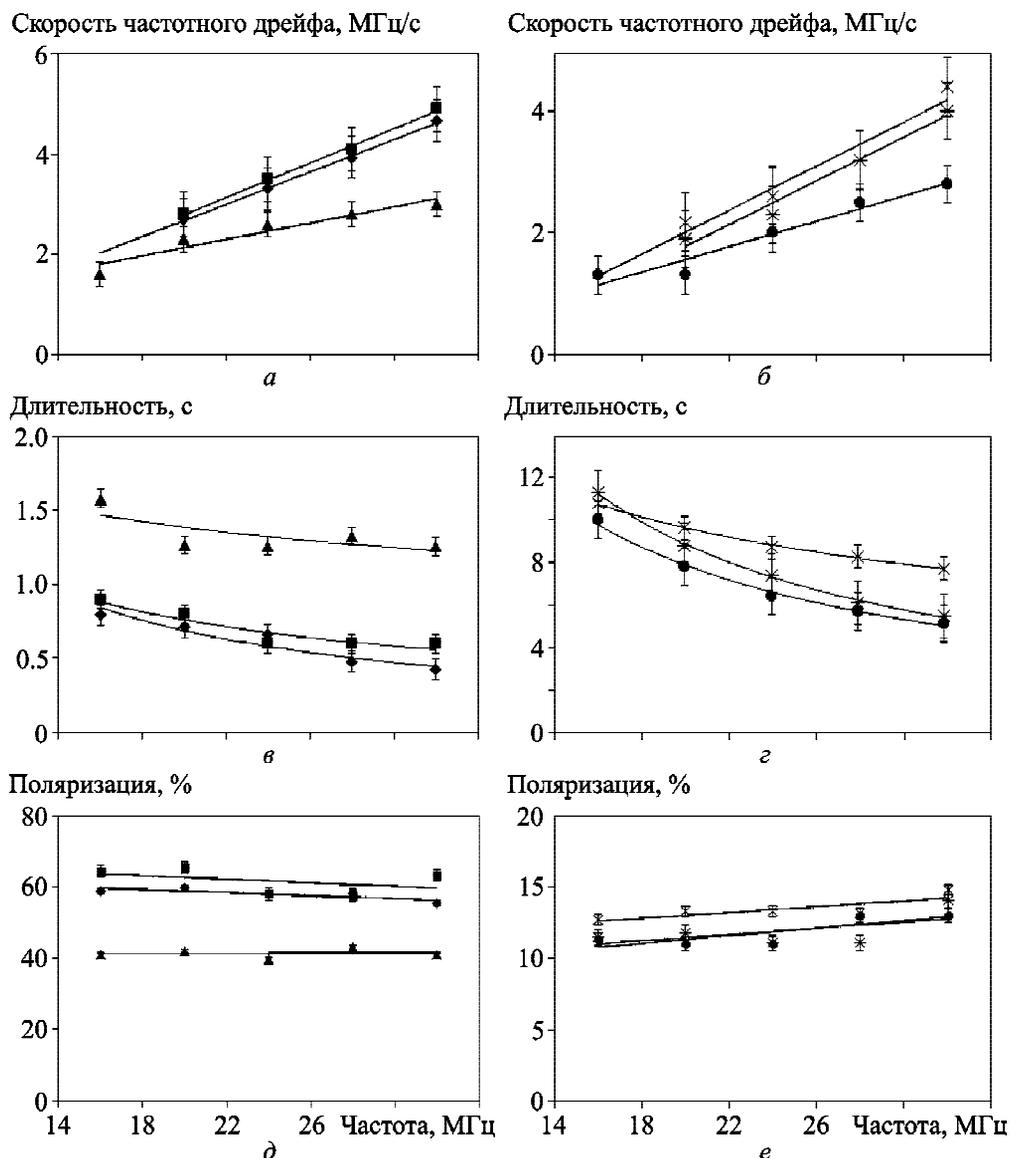


Рис. 4. Частотные зависимости средних значений скоростей частотного дрейфа (а) и (б), длительностей (в) и (г), а также степеней поляризации (д) и (е) всплесков Шб и Ш типа соответственно, наблюдавшихся 3 апреля, 5 июня и 5 сентября 2011 г.: \blacklozenge – Шб, 03.04.2011; \blacksquare – Шб, 5.06.2011; \blacktriangle – Шб, 5.09.2011; \times – Ш, 3.04.2011; $*$ – 5.06.2011; \bullet – 5.09.2011

значительно, имея тенденцию к очень слабому возрастанию с ростом частоты (рис. 4, е). Средняя степень поляризации всплесков Ш типа на различных частотах в разные дни изменялась от 3 до 17 %. Поляризация всплесков Шб типа была значительно больше (рис. 4, д). На разных частотах ее средние значения изменялись в пределах $40 \div 65$ %. Она медленно уменьшалась с ростом частоты 3 апреля и 5 июня, а 5 сентября, наоборот, очень медленно увеличивалась с ростом частоты. Такое поведение частотных зависимостей степени поляри-

зации пар всплесков Шб-Ш типа указывает на то, что поляризация, если и зависит от частоты, то эта зависимость слабая.

Ввиду малых продолжительностей сессий наблюдений пар всплесков Шб-Ш типа, выявить гелиодолготные зависимости параметров всплесков не представляется возможным. Но усредненные для каждого дня наблюдений значения скорости дрейфа, длительности и поляризации на каждой из частот показывают, что параметры пар всплесков, наблюдавшихся с двухмесячным и трехмесячным временным интервалом, отли-

чаются незначительно. Скорость частотного дрейфа, длительность и степень поляризации пар всплесков Шб-Ш типа проявляют малозаметную зависимость от даты наблюдений.

3. Обсуждение

Обсудим различные характеристики компонентов пар всплесков Шб-Ш с целью обнаружения возможной их гармонической связи.

3.1. Скорость дрейфа

Как видно из рис. 4, *a*, *б* и для всплесков Шб, и для всплесков Ш типа наблюдается довольно хорошо прослеживаемая линейная зависимость скорости дрейфа от частоты:

$$\frac{df}{dt} \approx -Af. \quad (1)$$

Впервые такая зависимость для всплесков Ш типа обсуждалась Вайлдом [14]. В случае мощных декаметровых всплесков Ш типа была получена такая же зависимость в работе [15]. Анализ, выполненный в [15], показал, что линейная зависимость скорости дрейфа от частоты реализуется в случае экспоненциальной модели плотности солнечной короны,

$$n(r) = n_0 \exp(-2Ar/v_s), \quad (2)$$

где $n(r)$ – зависимость плотности плазмы от расстояния до центра Солнца, v_s – скорость источника излучения.

Из выражения (2) следует, что коэффициент A определяется размером неоднородности плотности корональной плазмы $a = n/|dn/dr|$.

$$A = \frac{v_s}{2a}.$$

Для проанализированных в [15] мощных декаметровых всплесков Ш типа, наблюдавшихся в июле–августе 2002 г., коэффициент A изменялся в пределах от 0.8 до 0.12 с^{-1} . Для всплесков Шб и Ш типа, зарегистрированных 3 апреля, 5 июня и 5 сентября 2011 г., значения коэффициента A приведены в табл. 2. Видно, что они мало отличаются от коэффициентов, полученных для мощных декаметровых всплесков Ш типа [15]. В предположении, что скорость источника излу-

Таблица 2. Значения коэффициента A для различных дней наблюдения пар всплесков Шб-Ш

Дата	$A, \text{ с}^{-1}$	
	Всплеск Шб типа	Всплеск Ш типа
03.04.2011 г.	0.17	0.18
05.06.2011 г.	0.16	0.18
05.09.2011 г.	0.08	0.11

чения $v_s = 0.3c$, c – скорость света, получаем, что размеры неоднородностей короны для 3 апреля и 5 июня равны $2.7 \cdot 10^{10} \text{ см}$, а для 5 сентября составляют $6 \cdot 10^{10} \text{ см}$, что приблизительно равно размерам неоднородностей в случае мощных всплесков Ш типа [15]. Следует отметить также, что значения коэффициента A практически одинаковы для всплесков Шб и Ш типа для одного и того же дня наблюдений.

Скорость дрейфа первой гармоники всплесков Шб и Ш типа в предположении радиального пространства источника излучения в рамках плазменного механизма излучения определяется выражением

$$\frac{df_I}{dt} = \frac{df_{pe}}{dn} \frac{dn}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{f_{pe}}{2n} \frac{dn}{dr} v_s,$$

где и плотность плазмы $n(r)$, и производная dn/dr определяются в точке генерации излучения на местной плазменной частоте $f_I = f_{pe}$. Для скорости дрейфа второй гармоники этих всплесков в тех же условиях справедливо аналогичное выражение

$$\frac{df_{II}}{dt} = \frac{d(2f_{pe})}{dn} \frac{dn}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{(2f_{pe})}{2n} \frac{dn}{dr} v_s,$$

Здесь подразумевается, что излучение второй гармоники на частоте $f_{II} = 2f_{pe}$ происходит в области, где местная плазменная частота такая же, как в предыдущем случае, и поэтому соответственно плотность $n(r)$ и производная dn/dr берутся в той же точке. Следовательно отношение скоростей дрейфа на частотах $f_I = f_{pe}$ и $f_{II} = 2f_{pe}$ равно

$$\frac{df_I}{dt} \left(\frac{df_{II}}{dt} \right)^{-1} = \frac{1}{2}.$$

Очень важно то, что это отношение не зависит от модели плотности короны. Вычисление

такого же отношения согласно линейной зависимости (1) для 3 апреля, 5 июня и 5 сентября 2011 г. дает значения, несколько отличающиеся от 1/2, но достаточно близкие. Поэтому можно сказать, что анализ скорости дрейфа компонентов IIIb-III пар говорит в пользу их гармонической природы.

3.2. Длительность

Длительности всплесков IIIb и III типов (рис. 4, *в* и *г*) разительно отличаются в 8÷10 раз. Этот факт, скорее всего, говорит не в пользу гармонической связи компонентов в IIIb-III парах. Полученные характерные длительности всплесков IIIb и III типов являются стандартными для декаметрового диапазона. Детальный анализ [16] показывает, что, по-видимому, длительность всплесков III типа определяется размерами источников излучения, т. е. линейными размерами пучков электронов, которые ответственны за эти всплески. Функциональная зависимость длительности этих всплесков от частоты в этом случае определяется угловым расхождением пучка электронов: чем больше угол, тем более крутой является степенная зависимость

$$\tau \approx f^{-\alpha}. \quad (3)$$

Так, если этот угол равен 30°, то показатель степени α в (3) равен 0.6 [16]. В табл. 3 представлены значения этого показателя степени для всплесков IIIb и III типов для различных дней наблюдений. Можно сказать, что 3 апреля угол расхождения был несколько меньше 30°, а 5 июня и 5 сентября этот угол был заметно больше 30°.

Что касается длительности всплесков IIIb, то ее значения очень близки к временам столкновений частиц, если температура корональной плазмы около 10^6 К. Однако если это действи-

тельно так, то зависимость длительности всплесков IIIb от частоты должна быть степенной (3) с показателем степени 0.5. Получающиеся отличия (см. табл. 3) могут быть связаны с тем, что температура плазмы на разных высотах не является постоянной величиной, а изменяется с высотой. Такая ситуация обсуждалась для всплесков типа спайки [17] (по своим свойствам очень похожих на стриа-всплески), являющихся тонкой частотной структурой всплесков IIIb типа и определяющих, по сути, длительность всплесков IIIb.

3.3. Поляризация

Согласно рис. 4, *д*, *е* степень поляризации всплесков IIIb и III типов отличается в 3–4 раза для 5 сентября и в 5–6 раз для 3 апреля и 5 июня. Такое существенное отличие поляризации компонентов в парах IIIb-III всплесков скорее всего говорит в пользу их гармонической природы.

Действительно, считается, что первая гармоника излучения формируется путем трансформации ленгмюровских волн в поперечные электромагнитные волны в процессах $l+i=t+i$ без изменения частоты волны $\omega_l = \omega_t$. Пучок электронов при распространении через корональную плазму со скоростью $v_s \approx 0.3c$ возбуждает медленные необыкновенные волны (которые в плазме без магнитного поля носят название Ленгмюровских волн) с волновыми числами $k > \omega_{pe}/v_s$ ($\omega_{pe} = \sqrt{4\pi e^2 n/m}$ – плазменная частота). В основном значения волновых чисел сосредоточены вблизи минимального $k_{\min} \approx \omega_{pe}/v_s$ [18, 19]. Хотя имеется заметное число волн с большими значениями волновых чисел, вплоть до максимальных $k_{\max} \approx \omega_{pe}/v_{Te} \approx 1/r_{De}$. Как видно из рис. 5, медленные необыкновенные волны с волновыми числами от $k_{\min} \approx 0.05\omega_{pe}/v_s$ до k^* будут трансформироваться исключительно в обыкновенные волны и только часть волн с волновыми числами $k > k^*$ трансформируется частично в быстрые необыкновенные волны. Разность количества обыкновенных и необыкновенных волн определяет поляризацию электромагнитных волн из данной области. Так как волновые числа медленных необыкновенных волн в основном сосредоточены в пределах от $k_{\min} \approx 0.05\omega_{pe}/v_s$ до k^* , то в излучении будут преобладать обыкновенные

Таблица 3. Значения коэффициента α для различных дней наблюдения пар всплесков IIIb-III

Дата	α	
	Всплеск IIIb типа	Всплеск III типа
03.04.2011 г.	0.9	0.5
05.06.2011 г.	0.7	1.1
05.09.2011 г.	0.3	1.0

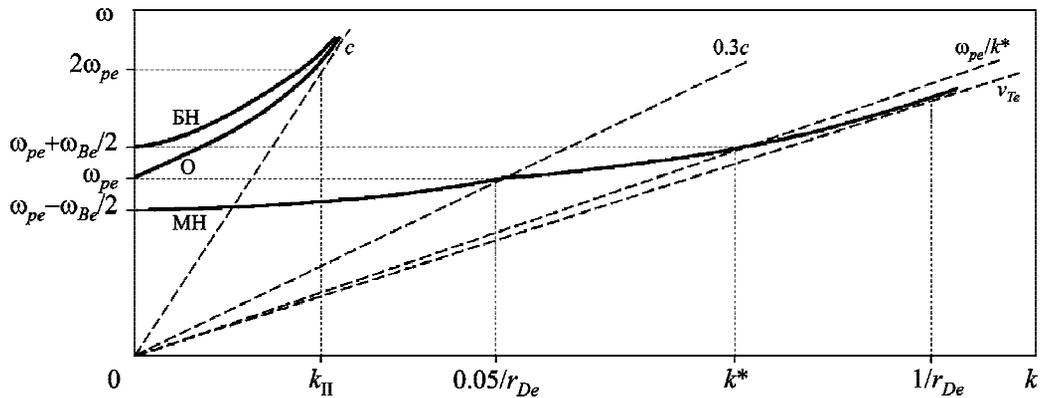


Рис. 5. Дисперсионные кривые для быстрых необыкновенных (БН), обыкновенных (О) и медленных необыкновенных (МН) волн

волны, поэтому поляризация будет определяться именно этими волнами и степень поляризации будет высокой. Волновое число k^* на данной плазменной частоте определяется циклотронной частотой $k^* \approx \frac{\omega_{pe}}{v_{Te}} \sqrt{\omega_{Be}/3\omega_{pe}}$ ($\omega_{Be} = eB/mc$ – циклотронная частота), т. е. значением магнитного поля. Так, если магнитное поле $B = 1$ Гс, то $k^* = 0.18/r_{De}$. Задаваясь спектральной плотностью энергии медленных необыкновенных волн, в принципе возможно по степени поляризации всплесков III типа или IIIb типа на первой гармонике определить магнитное поле в месте генерации. Этот вопрос выходит за рамки представленной статьи и будет обсужден в работе, посвященной диагностике плазмы по поляризационным свойствам всплесков III типа. Здесь мы только показали, что первая гармоника излучения естественным образом имеет высокую степень поляризации, и это обусловлено плазменным механизмом излучения.

В плазменном механизме излучения вторая гармоника излучения образуется в процессах слияния двух медленных необыкновенных волн с противоположно направленными волновыми векторами [20]. При этом частота образовавшейся волны, то ли быстрой необыкновенной, то ли обыкновенной, будет равна удвоенной местной плазменной частоте $\omega_{II} = 2\omega_{pe}$. При этом ее волновое число равно $k_{II} \approx \sqrt{3} \omega_{pe}/c$ и не зависит от волновых чисел медленных необыкновенных волн. Поэтому относительное количество обыкновенных волн будет в основном определяться не рас-

пределением плазменных волн по волновым числам, а вероятностями трансформации медленных необыкновенных волн в обыкновенные и необыкновенные волны, которые мало отличаются друг от друга [21].

Таким образом, мы видим, что в плазменном механизме излучения первая гармоника обладает большой степенью поляризации, а вторая гармоника, наоборот, имеет небольшую поляризацию. Именно так обстоит дело с поляризацией в парах IIIb-III всплесков, что указывает на гармоническую связь этих компонентов.

3.4. Отношение частот

В дни с максимальным количеством всплесков апрельской, июньской и сентябрьской сессий наблюдений, а именно: 3 апреля – 44 пары, 5 июня – 41 пара и 5 сентября – 23 пары, определено отношение частот f_{III}/f_{IIIb} для всплесков III и IIIb типа в один и тот же момент времени. Это отношение вычислялось для момента времени, когда максимум всплеска IIIb типа находился на частоте 16 МГц. Мы получили отношение частот, равное 1.94, 1.93 и 1.87 для 3 апреля, 5 июня и 5 сентября соответственно. Эти значения близки к требуемому отношению, равному 2, в случае, если это гармонические компоненты. Небольшие отличия от 2 могут быть связаны с тем, что в месте генерации излучения групповая скорость второй гармоники больше групповой скорости первой гармоники [22], а это приводит к тому, что вторая гармоника приходит на Землю несколько раньше первой гармоники. Поэтому естественно, что отношение частот вто-

рой и первой гармоник в один тот же момент времени несколько меньше 2 и определяется свойствами плазмы короны в месте генерации излучения. То есть можно заключить, что отношение частот в парах IIIb-III также говорит в пользу того, что всплески IIIb типа и всплески III типа являются первой и второй гармониками излучения.

4. Заключение

Анализ пар всплесков IIIb-III показал, что имеются свидетельства как в пользу, так и против гармонической связи компонентов этих пар. В пользу говорит близкое к 2 отношение мгновенных частот компонентов. Меньшее его значение, полученное из наблюдений, имеет естественное объяснение в рамках плазменного механизма излучения. Полученное отношение скоростей дрейфа двух гармонических компонентов также подтверждает предположение о гармонической связи. Важным аргументом в пользу гармонической связи компонентов в парах IIIb-III являются поляризационные наблюдения. Вместе с тем наблюдательные данные говорят о том, что длительности всплесков IIIb и III типов определяются различными причинами. Если длительность всплесков III типа связана с размером источников излучения, то длительность всплесков IIIb типа, по сути, определяется столкновениями частиц. Последнее обстоятельство указывает, по всей видимости, на то, что излучение этих всплесков каким-то образом связано с плазменными волнами, которые существуют уже после прохождения пучков электронов. Тогда, действительно, время жизни этих волн, а следовательно, и длительность излучения будет определяться временем существования этих волн в данном месте. Известно [21], что оно обусловлено временем затухания плазменных волн или временем столкновений. С такими плазменными волнами может быть связана и другая особенность всплесков IIIb типа, а именно наличие тонкой частотной структуры в виде стриа-всплесков. Как было показано в работах Такакуры [7] и Контаря [23], в случае распространения пучка электронов в плазме с вариациями плотности плазменные волны будут возбуждаться в основном в отдельных пространст-

венно ограниченных областях, что затем проявляется в тонкой частотной структуре всплесков IIIb типа. Таким образом, учет данного обстоятельства позволит, на наш взгляд, построить непротиворечивую теорию генерации пар всплесков IIIb-III типа.

Работа была проведена частично в рамках проекта “SOLSPANET” (номер FP7-PEOPLE-2010-IRSES-269299).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Suzuki S. and Dulk G. A.* Bursts of type III and type V. In: McLean D. J., Labrum N. R., editors. *Solar Radiophysics*. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – P. 289–332.
2. *Ellis G. R. A. and McCulloch P. M.* Frequency splitting of solar radio bursts // *Aust. J. Phys.* – 1967. – Vol. 20. – P. 583–594.
3. *Abranin E. P., Bazelyan L. L., and Tsybko Ya. G.* Harmonic relation of type IIIb-III solar radio bursts in 6.25, 12.5 and 25 MHz octaves // *Sol. Phys.* – 1984. – Vol. 91, Is. 2. – P. 377–381.
4. *De la Noë J. and Boischoat A.* The Type IIIb Bursts: A Precursor of Decametre Type III Radio-Burst // *Astron. Astrophys.* – 1972. – Vol. 20. – P. 55–62.
5. *Krishan V., Subramanian K. R., and Sastry Ch. V.* Observations and interpretation of solar decameter type IIIb radio bursts // *Sol. Phys.* – 1980. – Vol. 66, Is. 2. – P. 347–355.
6. *De la Noë J.* Spectral characteristics of stria, split pair and triple bursts // *Astron. Astrophys.* – 1975. – Vol. 43, No. 2. – P. 201–214.
7. *Takakura T. and Youse, S.* Type IIIb radio bursts: 80 MHz source position and theoretical model // *Sol. Phys.* – 1975. – Vol. 40, Is. 2. – P. 421–438.
8. *Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В., Булацен В. Г., Браженко А. И., Ваццишин Р. В.* Радиотелескоп декаметрового диапазона длин волн Уран-2 // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 345–356.
9. *Brazhenko A. I., Bulatsen V. G., Vashchishin R. V., Frantsuzenko A. V., Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Abranin E. P., Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Lecacheux A., and Rucker H.* New decameter radiopolarimeter URAN-2 // *Kinematika i Fizika Nebesnyh Tel. Suppl.* – 2005. – Vol. 21, No. 5. (suppl) – P. 43–46.
10. *Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R. V., Vinogradov V. V., and Denis L.* A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: An efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 510. – id. A16. – DOI:10.1051/0004-6361/200913335.
11. *Melnik V. N., Rucker H. O., Konovalenko A. A., Dorovskyy V. V., and Tan S.* Decameter IIIb-III pairs // *Proc. of*

- the EPSC-DPS Joint Meeting, 2011 2-7 October. – Nantes (France). – 2011. – P. 796.
12. *Stepanova N. A., Bazelyan L. L., Abranin E. P., Brazhenko A. I., Sapogov S. A., and Tsybko Ya. G.* Decameter solar type III bursts: data classification with use of cluster analysis // *Sol. Phys.* – 1995. – Vol. 156, Is. 2. – P. 131–143.
 13. *Ginzburg V. L. and Zhelezniakov V. V.* On the possible mechanisms of sporadic solar radio emission (radiation in an isotropic plasma) // *Sov. Astron.* – 1958. – Vol. 2. – P. 653–678.
 14. *Wild J. P.* Observations of the spectrum of high-intensity solar radiation at metre wavelengths. III. Isolated bursts // *Aust. J. Sci. Res. A.* – 1950. – Vol. 3. – P. 541–557.
 15. *Melnik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Boiko A. I., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., and Lecacheux A.* Observations of Powerful Type III Bursts in the Frequency Range 10–30 MHz // *Sol. Phys.* – 2011. – Vol. 269, Is. 2. – P. 335–350.
 16. *Руткевич Б. П., Мельник В. М.* Распространение радиоизлучения всплесков III типа в солнечной короне. 1. Временной профиль // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 23–31.
 17. *Melnik V. N., Shevchuk N. V., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Dorovskyy V. V., Poedts S., and Lecacheux A.* Solar Decameter Spikes // *Sol. Phys.* – 2014. – Vol. 289, Is. 5. – P. 1701–1714.
 18. *Мельник В. Н.* К вопросу о “газодинамическом” разлете потока быстрых электронов в плазме // *Физика плазмы.* – 1995. – Т. 21, № 1. – С. 94–96.
 19. *Mel'nik V. N., Lapshin V., and Kontar E.* Propagation of a Monoenergetic Electron Beam in the Solar Corona // *Sol. Phys.* – 1999. – Vol. 184, Is. 2. – P. 353–362.
 20. *Mel'nik V. N. and Kontar E.* Plasma Radio Emission of Beam-Plasma Structures in the Solar Corona // *Sol. Phys.* – 2003. – Vol. 215, Is. 2. – P. 335–341.
 21. *Цытович В. Н.* Нелинейные эффекты в плазме. – М.: Наука, 1967. – 287 с.
 22. *Браженко А. И., Пылаев О. С., Мельник В. Н., Кonovalenko A. A., Французенко А. В., Доровский В. В., Вацущин Р. В., Рукер Х. О.* Наблюдение трех гармонических компонентов солнечных всплесков III типа в декаметровом диапазоне длин волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 283–290.
 23. *Kontar E. P.* Dynamics of electron beams in the solar corona plasma with density fluctuations // *Astron. Astrophys.* – 2001. – Vol. 375, No. 2. – P. 629–637. – DOI: 10.1051/0004-6361:20010807.

А. І. Браженко¹, В. М. Мельник², А. В. Французенко¹, В. В. Доровський², Г. О. Рукер³, М. Панченко³

¹Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36014, Україна

²Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

³Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук, вул. Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

ЩОДО ГАРМОНІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ КОМПОНЕНТІВ У ПАРАХ ІІІb–ІІІ СПЛЕСКІВ У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Аналізуються властивості пар сплесків ІІІb–ІІІ типу, що спостерігалися на радіотелескопі УРАН-2 у діапазоні частот 16 ÷ 32 МГц. Спостереження виконувалися у квітні, червні та вересні 2011 р. Проаналізовані тривалість, швидкість частотного дрейфу, відношення частот у певний момент часу та ступінь поляризації пар сплесків ІІІb–ІІІ типу. Зважуються усі за та проти їх гармонічного зв'язку.

А. І. Браженко¹, V. N. Melnik², A. V. Frantsuzenko¹, V. V. Dorovskyy², H. O. Rucker³, and M. Panchenko³

¹Poltava Gravimetric Observatory, S. Subotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36014, Ukraine

²Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

³Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 6, Schmiedlstrasse, Graz, 8042, Austria

ON THE HARMONIC COUPLING OF COMPONENTS IN PAIRS OF IIIb–III BURSTS AT DECAMETER WAVELENGTHS

The properties of IIIb–III pairs observed by the URAN-2 radio telescope at frequencies 16–32 MHz are analyzed. Observations of these bursts were hold in April, June and September 2011. Durations, frequency drift rates, simultaneous frequency ratio of pairs components and their polarizations are analyzed. Pro and contra of IIIb–III harmonic connection are discussed.

Статья поступила в редакцию 14.04.2015