

Солнечные всплески типа “дрейфующие пары” в декаметровом диапазоне длин волн

В. Н. Мельник, А. А. Коноваленко, В. В. Доровский,
Э. П. Абрагин, В. Н. Лисаченко, Х. О. Рукер¹, А. Лекашо²

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: dorovsky@ira.kharkov.ua*

¹*Институт Космических исследований, Грац, Австрия
E-mail: helmut.rucker@oeaw.ac.at*

²*Парижская обсерватория, Медон, Франция
E-mail: alain.lecacheux@obsptm.fr*

Статья поступила в редакцию 21 января 2005 г.

В настоящей статье сообщается о результатах наблюдения солнечных всплесков типа “дрейфующие пары” на радиотелескопе УТР-2 во время шумовой бури 13-15 июля 2002 г. Использование новой регистрирующей аппаратуры с высоким временным и частотным разрешением позволило получить новую информацию о структуре и особенностях этих всплесков.

Приводятся результаты статистического анализа более чем 700 дрейфующих пар отдельно для “прямых” и “обратных” всплесков. Отмечается, что “прямые” и “обратные” всплески имеют ряд сходных параметров, таких как временная задержка между элементами пары, длительность одного элемента, мгновенная ширина полосы. В то же время, они имеют существенные отличия, прежде всего, в скорости частотного дрейфа. Так, среднее значение скорости частотного дрейфа для “прямых” всплесков составляет 0.8 МГц/с, а для “обратных” – 2 МГц/с. Найдены эмпирические зависимости потока излучения и скорости дрейфа от частоты, которые отличаются от полученных ранее. Сообщается о наблюдениях необычных вариантов дрейфующих пар, в частности, Λ – всплесков, а также всплесков с тонкой частотно-временной структурой.

В работе предлагается новый механизм генерации дрейфующих пар, в котором излучение этих всплесков формируется при взаимодействии ленгмюровских волн l с магнитозвуковыми волнами M , у которых фазовая скорость совпадает с групповой (процессы $l + M = t$, $l + M = t + M$).

Введение

Солнечные всплески радиоизлучения типа “дрейфующие пары” (ДП) наблюдаются с конца 50-х годов. Дж. Робертс [1] впервые выделил их в отдельный класс событий, связанных с бурями всплесков III типа, по совокупности характерных при-

знаков. Согласно его наблюдениям ДП обычно состоит из двух разделенных во времени сравнительно коротких всплесков (элементов ДП), дрейфующих по частоте с характерными абсолютными скоростями $2 \div 8$ МГц/с преимущественно от низких частот к высоким – так называемые “обратные” всплески – и реже от высоких частот

к низким – “прямые” всплески. В работе [2] отмечается, что примерно 30 % из наблюдавшихся авторами ДП имеют “прямой” (отрицательный) дрейф, и соответственно 70 % – “обратный” (положительный). При этом скорости дрейфа элементов пары примерно равны и не зависят от частоты излучения. По данным работы [2] ДП наблюдаются исключительно в диапазоне частот от 25 до 70 МГц, причем частота их появления увеличивается к низкочастотному краю диапазона. Еще одной особенностью ДП является постоянство временной задержки второго элемента ДП относительно первого, которая во всем диапазоне частот находится в пределах $1 \div 2$ с и не зависит от частоты [1]. По данным, приведенным в работе [3], оба элемента ДП имеют в подавляющем большинстве случаев одинаковый знак круговой поляризации, в то время как степень поляризации компонент различна. Авторы работы [3] приводят результаты гелиографических наблюдений, согласно которым положение источников первого и второго элемента ДП одинаковы и совпадают с положением источников связанных с ними всплесков III типа. Среди разновидностей ДП следует отметить появление одиночных элементов ДП, ДП с аномально высокой скоростью дрейфа [2], всплесков, состоящих из трех элементов [4], “узких” (мгновенная частотная ширина одного элемента $\delta f < 0.4$ МГц) и “диффузных” ($\delta f \approx 1$ МГц) ДП [5]. В работе [6] сообщается о наблюдении гармонической структуры ДП на частотах 12.5 МГц (основная гармоника) и 25 МГц (вторая гармоника). В той же работе приводятся наблюдательные данные, свидетельствующие о приблизительном равенстве количества “прямых” и “обратных” ДП.

Для изучения всплесков типа ДП требуется регистрирующая аппаратура с высоким временным и частотным разрешением, а вследствие низкой интенсивности большого числа всплесков необходимо использовать антенны с высокой эффективной площадью, что не всегда обеспечивалось во время предыдущих наблюдений. Этим требова-

ниям в наибольшей степени удовлетворяет радиотелескоп УТР-2 [7], оснащенный в настоящее время современной регистрирующей аппаратурой – 60-канальным спектрометром и цифровым спектрополяриметром DSP [8].

В последнее время активно осуществляется программа использования крупнейших радиотелескопов декаметрового диапазона с применением высокоэффективных средств регистрации для выполнения различных астрофизических задач [9, 10], включая изучение радиоизлучения Солнца [11]. Положительный опыт в этом направлении дает основания ожидать новые данные о свойствах и природе всплесков типа ДП.

В настоящей статье приведены результаты наблюдений солнечных всплесков типа ДП, которые были получены во время наблюдательной кампании в июле 2002 г. на радиотелескопе УТР-2. Сочетание большой эффективной площади антенны и высокой разрешающей способности регистрирующей аппаратуры позволило детально исследовать свойства этих всплесков. Кроме того, в статье предлагается механизм излучения ДП в процессах взаимодействия ленгмюровских волн с магнитозвуковыми волнами, которые генерируются пучками частиц со скоростями, равными фазовой и групповой скоростям магнитозвуковых волн.

Наблюдения

Наблюдения всплесков типа ДП проводились на трех секциях северного плеча радиотелескопа УТР-2, что обеспечивало диаграмму направленности шириной порядка 1° по склонению и 13° по прямому восхождению на частоте 25 МГц. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался спектрополяриметр DSP, работавший в полосе 12 МГц с частотным разрешением 12 кГц и временным разрешением 20, 50 или 100 мс, а также 60-канальный спектрометр, работавший в полосе частот 20 МГц с частотным разрешением 300 кГц и вре-

менным разрешением 20 или 50 мс. Чувствительность радиотелескопа при частотном разрешении 12 кГц и временном разрешении 50 мс составила 0.01 с. е. п. (1 с. е. п. = 10^4 Ян). Наблюдения проводились ежедневно с 6:00 до 12:00 UT, что соответствовало интервалу времени ± 3 часа около местного полудня.

Особенностью бури всплесков III типа, продолжавшейся с 11 до 21 июля 2002 г. было необычно большое количество всплесков типа ДП. Пик активности этих всплесков пришелся на 13-15 июля, когда регистрировалось до 300 ДП за один сеанс наблюдений. В последующие дни количество этих всплесков монотонно уменьшалось. Всего за три дня было зарегистрировано 774 всплеска. В указанный период активная область № 249 (Пулковский каталог) двигалась по диску Солнца с востока на запад и пересекла нулевой меридиан между 15 и 16 июля. Фрагмент записи динамического спектра, иллюстрирующий активность появления ДП во время бури, представлен на рис. 1.

Обработка результатов наблюдений показала, что не все характеристики зарегистрированных нами всплесков соответствуют полученным ранее характеристикам ДП в частотном диапазоне $27 \div 70$ МГц. Так, нами наблюдались ДП как с положительным, так и с отрицательным частотным дрейфом. Однако, если в работе [2] указывалось, что преимущественно наблюдаются “обратные” ДП, то в нашем случае соотношение между “обратными” и “прямыми” всплесками не было постоянным и менялось в течение бури (на такую особенность обращали внимание авторы работы [6]). Отношение количества “прямых” всплесков к “обратным” 13 июля было 109 к 89, 14 июля – 186 к 123 и 15 июля – 109 к 158. Как и отмечалось в [2], количество наблюдаемых ДП увеличивается к низкочастотному краю диапазона (до 25 МГц). Наши наблюдения на более низких частотах (до 10 МГц) показали, что ниже 25 МГц количество ДП начинает уменьшаться. При этом в основном уменьшается число “обратных” всплесков, в то время как

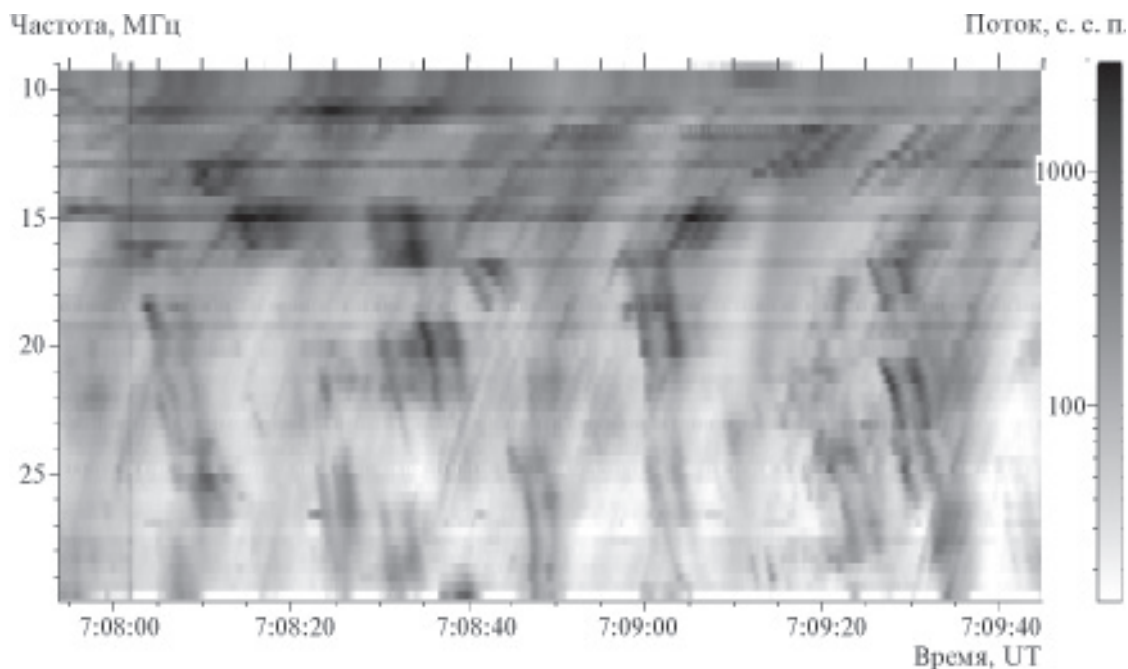


Рис. 1. Фрагмент динамического спектра шумовой бури 15 июля 2002 г.

“прямые” всплески имеют более или менее равномерное распределение вплоть до 17 МГц, после чего тоже начинается спад (рис. 2).

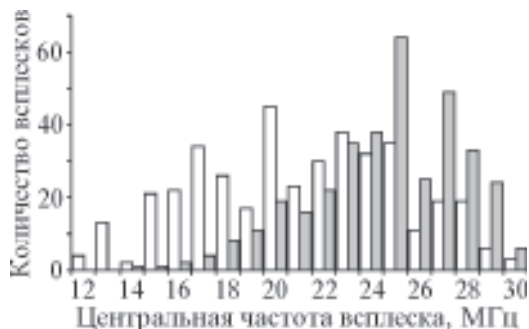


Рис. 2. Распределение “прямых” (светлые столбцы) и “обратных” (затененные столбцы) ДП по центральной частоте

Абсолютная скорость частотного дрейфа ДП в наших наблюдениях находилась в пределах $0.5 \div 5$ МГц/с, в отличие от приведенных в работе [12] значений $2 \div 8$ МГц/с. При этом распределения “прямых” и “обратных” ДП по абсолютным значениям скоростей дрейфов существенно различались (рис. 3, таблица). Легко заметить, что диапазон изменения скоростей дрейфов (стан-

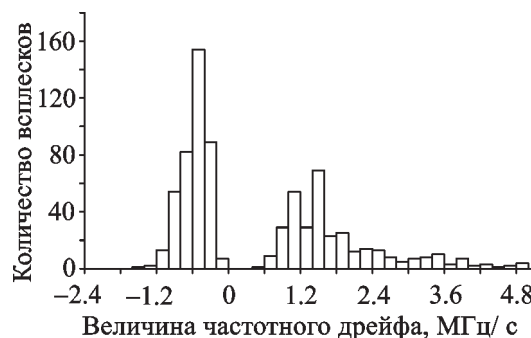


Рис. 3. Распределение “прямых” (светлые столбцы) и “обратных” (затененные столбцы) ДП по скоростям их частотного дрейфа

дартное отклонение) для “прямых” ДП заметно уже, а среднее значение дрейфа – меньше, чем для “обратных” ДП. Необходимо также отметить, что аномально большие скорости дрейфа ($5 \div 20$ МГц/с), о которых упоминается в [2], наблюдались нами только у “обратных” ДП. В то же время в редких случаях наблюдались “прямые” ДП с аномально низкой скоростью дрейфа (порядка 0.3 МГц/с).

В работах [1] и [4] сообщалось, что скорость частотного дрейфа ДП никак не связана с центральной частотой всплеска. Однако последующие наблюдения [2] показали, что имеется очевидная тенденция

Таблица. Статистические характеристики распределения скоростей частотного дрейфа ДП по выборке из 774 всплесков

Период наблюдений	11 ÷ 21 июня		13 июля		14 июля		15 июля	
	Прямые	Обратные	Прямые	Обратные	Прямые	Обратные	Прямые	Обратные
Среднее значение скорости дрейфа, МГц/с	-0.78	2.08	-0.93	1.88	-0.75	1.75	-0.67	2.46
Стандартное отклонение скорости дрейфа, МГц/с	0.42	1.6	0.70	1.48	0.23	1.15	0.19	1.89

роста скорости дрейфа с частотой. Анализ результатов наших наблюдений представлен на рис. 4 и подтверждает последнее утверждение. Хорошо видно, что среднее значение скоростей дрейфа как “прямых”, так и “обратных” всплесков увеличивается с частотой. Особенно ярко этот эффект проявляется в случае “обратных” ДП. Зависимость скорости дрейфа “обратных” и “прямых” ДП от частоты может быть выражена следующей эмпирической степенной зависимостью:

$$\dot{f} = df/dt = A \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^P + C,$$

где \dot{f} – скорость частотного дрейфа в МГц/с; f – центральная частота всплеска в МГц; f_0 – частота нормировки, равная в нашем случае частоте максимума распределения ДП (25 МГц согласно рис. 2). При этом для “прямых” всплесков $A = -0.5$ МГц/с, $P = 2.7$, $C = -0.4$ МГц/с при максимальной ошибке аппроксимации ± 0.05 МГц/с, а для “обратных” – $A = 2.3$ МГц/с, $P = 6.2$ и $C = 1$ МГц/с при максимальной ошибке аппроксимации ± 0.09 МГц/с. Следует отметить, что приведенная выше зависимость скорости час-



Рис. 4. Зависимость модуля скорости частотного дрейфа $|df/dt|$ “прямых” (кривая 1) и “обратных” (кривая 2) ДП от частоты

тотного дрейфа от частоты, равно как и аналитическое ее представление справедливы только в том диапазоне частот, в котором проводились наблюдения, т. е. от 12 до 30 МГц.

Одним из наиболее характерных признаков ДП является постоянство времени запаздывания ΔT второго элемента всплеска относительно первого. Значения этого параметра, определенные по выборке из 200 всплесков, находятся в пределах $1.4 \div 2.6$ с, со средней величиной 1.7 с для “прямых” и 2.0 с для “обратных” ДП, и незначительно уменьшаются с ростом частоты. Распределение ДП по этому параметру приведено на рис. 5.

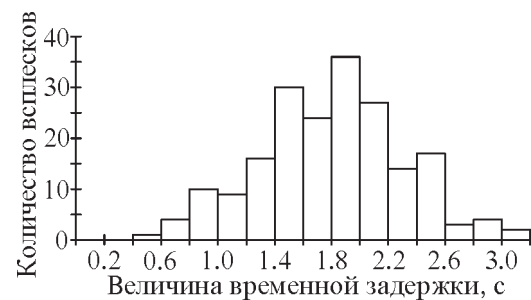


Рис. 5. Распределение всплесков типа ДП по величине временной задержки ΔT между их элементами

Длительности τ элементов ДП для всплесков с дрейфами обоих знаков изменялись от 0.8 до 2 с со средним значением 1.3 с без существенной зависимости от частоты. По длительности τ элемента пары ДП можно разделить на “узкие” (длительность одного элемента $\tau \leq 1$ с) и “диффузные” ($\tau > 2$ с), как это было сделано в работе [5], с той лишь разницей, что в последнем случае всплески классифицировались по мгновенной ширине их спектра δf . Примеры динамических спектров “диффузной” и “узкой” ДП показаны на рис 6.

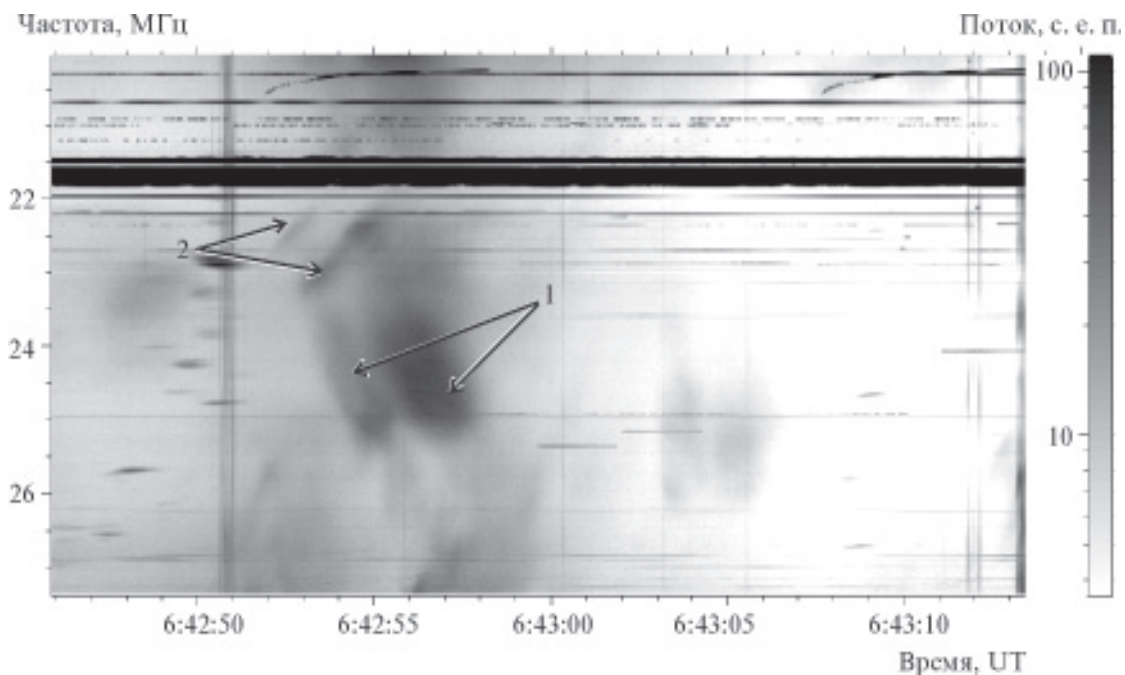


Рис. 6. *Динамические спектры “диффузной” (1) и “узкой” (2) ДП, зарегистрированные спектрополяриметром DSP 13 июля 2002 г. (временное разрешение 50 мс)*

Общая полоса частот, занимаемая одним всплеском, Δf по нашим наблюдениям находилась в пределах от 0.9 до 10 МГц со средними значениями 4 и 3 МГц для “прямых” и “обратных” всплесков соответственно, что не противоречит приведенным в [2] данным – $\Delta f = 1.5 \div 8$ МГц.

Потоки излучения I анализируемых в данной работе всплесков были умеренными и заключались в пределах от 5 до 100 с. е. п., со средним значением 35 с. е. п. При этом среднее значение потока 51 с. е. п. для “обратных” всплесков более чем в два раза превышало соответствующую величину для “прямых” всплесков 22 с. е. п. Дополнительно был проведен анализ возможной зависимости потока I от частоты, результаты которого приведены на рис. 7. Очевидна тенденция убывания потока с частотой для ДП с дрейфом обоих знаков. Следует отметить только, что если поток “прямых” всплесков убывает практически монотонно, то для “обратных” можно выделить области незначительного увеличения потока (в диапазоне

20 ÷ 21 МГц) и резкого его убывания (от 21 до 25 МГц).

Наряду с классическими всплесками типа ДП были обнаружены также необычные их варианты. В описываемый период

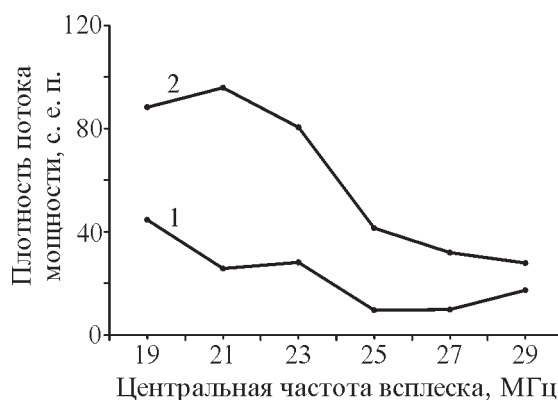


Рис. 7. *Зависимость плотности потока “прямых” (кривая 1) и “обратных” (кривая 2) всплесков от частоты*

нами было зарегистрировано более десяти Λ -всплесков – комбинации “прямых” и “обратных” ДП, при которой окончание первой ДП совпадает с началом второй. О наблюдении таких всплесков сообщалось в [4], где они были названы “hook”-всплесками. На рис. 8 приведены динамические спектры Λ -всплеска и перевернутого Λ -всплеска, наблюдавшихся 13 июля 2002 г.

Динамические спектры некоторых всплесков представляли собой не сплошные линии, а состояли из более мелких структур, имевших зачастую отличный от основного всплеска частотный дрейф. Ранее считалось, что подобная тонкая структура может наблюдаться только в спектрах всплесков типа S, близких по параметрам к ДП [13]. Примеры ДП с тонкой структурой приведены на рис. 9.

Так, всплеск, зарегистрированный 13 июля 2002 г., в (рис. 9, а), имеет поло-

жительный дрейф 8 МГц/с, в то время как субвсплески дрейфуют со скоростью -0.6 МГц/с. Ширина спектра этих субвсплесков ≈ 400 кГц, а частотный интервал между ними около 1 МГц. На рис. 9, б показана “обратная” ДП с дрейфом $+1.4$ МГц/с и временем запаздывания $\Delta T = 2$ с, которая имеет клочковатую структуру с характерными масштабами 1 с и 400 кГц.

В отличие от данных, приведенных в [6], среди обработанных более чем 700 ДП нами не было обнаружено гармонической структуры в излучении этого типа. Авторы полагают, что в приведенном в [6] эксперименте была велика вероятность ложного определения гармонической структуры вследствие ограниченного частотного разрешения эксперимента (6 фиксированных частот), а также малого количества зарегистрированных всплесков.

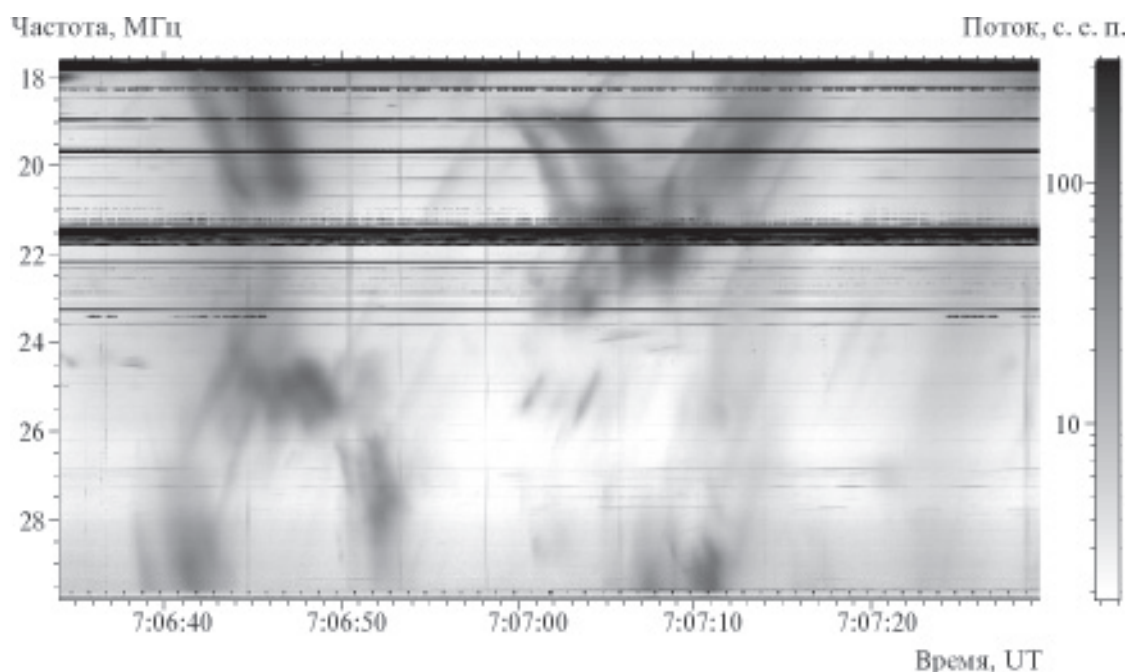
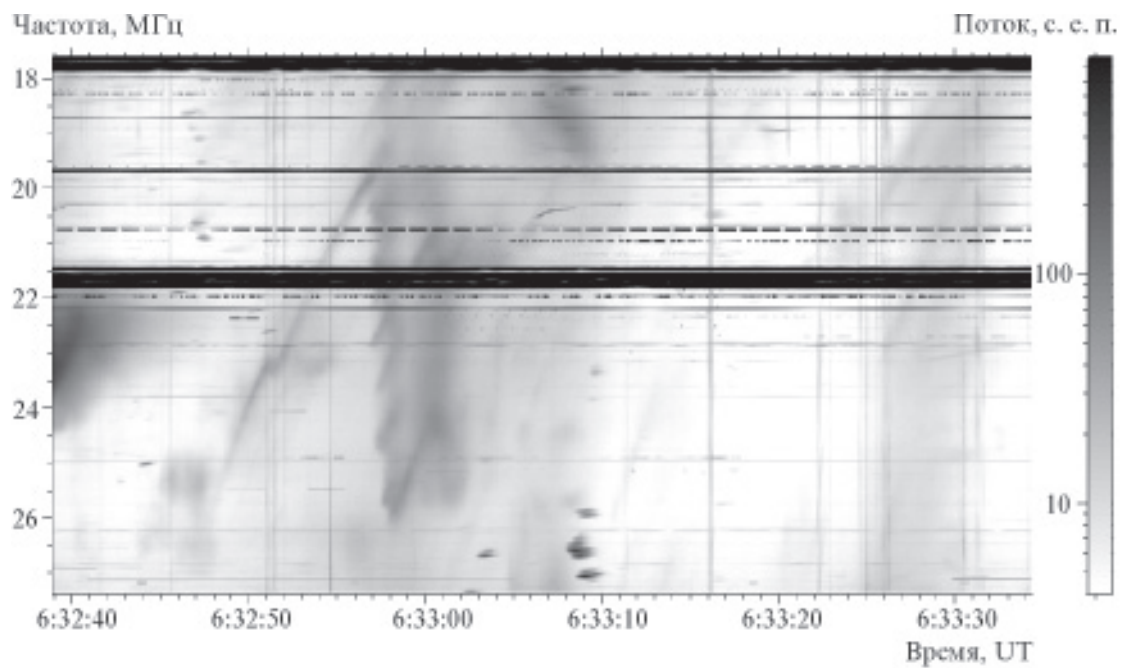
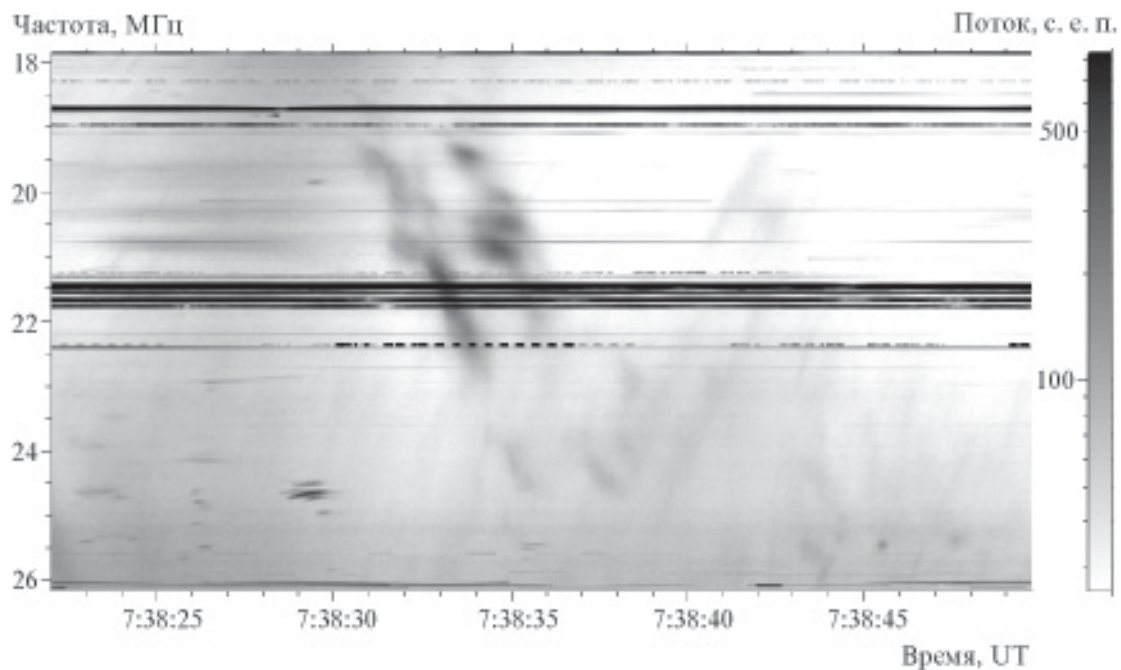


Рис. 8. Динамические спектры Λ -всплеска (7:06:04 ÷ 7:06:50 UT) и перевернутого Λ -всплеска (7:07:00 ÷ 7:07:15 UT), зарегистрированные спектрополяриметром DSP 13 июля 2002 г. (временное разрешение 50 мс)



а)



б)

Рис. 9. Динамические спектры ДП, зарегистрированные спектрополяриметром DSP 13 июля 2002 г. (а) и 16 июля 2004 г. (б):

а) – с тонкой структурой в виде субвсплесков; б) – с клочковатой тонкой структурой

Обсуждение

На сегодняшний день не существует удовлетворительной модели ДП, которая объясняла бы их основные наблюдаемые свойства. Более того, нет предпочтения определенной точке зрения на то, с чем связано появление двух компонент ДП. То, что второй наблюдаемый элемент сдвинут во времени, т. е. запаздывает относительно первого, может означать, что в области источника генерируются две одинаковые волны, которые проходят разные пути, как это показано в моделях ДП с отражением от нижележащих областей [1], либо с отражениями от стенок дакта [12]. Другая возможность реализуется, если генерируются две разные волны или две волны одного типа, но с разными частотами. Тогда из-за разности в групповых скоростях может появиться требуемая временная задержка.

Впервые модель ДП предложил Дж. Робертс [1] в 1958 г. Он предполагал, что излучение происходит на удвоенной плазменной частоте и один из лучей распространяется к наблюдателю, а другой – вначале к Солнцу, затем отражается от слоя с критической плотностью и также приходит к наблюдателю. Однако в этом случае, как отмечалось в [14], второй элемент должен быть не только ослаблен, но и размыт, что не наблюдается. Кроме того, гелиографические наблюдения [3] показали, что местоположения источников обеих компонент практически совпадают. В рамках этой же модели наличие положительного и отрицательного частотного дрейфа связывалось с ускорением частиц как в направлении от Солнца, так и к нему. Несколько измененную модель предложил Д. Б. Мелроуз [12]. В ней две компоненты формируются за счет отражения от стенок дакта. Однако наблюдения местоположений источников излучения [3] не подтверждают эту модель. Трудно также понять практически фиксированное значение задержки в $1.5 \div 2.5$ с и отсутствие меньших задержек.

В работе [5] была предложена модель, в которой компоненты ДП генерируются двумя коррелированными источниками, в роли которых выступают ударные волны, распространяющиеся от центра стримера в противоположные стороны. Многочисленные трудности этой модели связаны с источником ударных волн, отсутствием наблюдаемой связи ДП и всплесков III типа, поляризацией компонент, формированием двух лучей, направленных на Землю [12].

В 1978 г. В. В. Зайцев и Б. Н. Левин [15] предложили механизм генерации ДП, основанный на возбуждении плазменных волн вблизи двойного плазменного резонанса с последующей их трансформацией в электромагнитные волны в результате комбинационного рассеяния. Однако для реализации такого механизма требуется выполнение жестких условий для скорости быстрых электронов, градиента плотности плазмы, через которую они проходят, магнитного поля, а также строго определенных соотношений между этими величинами. Трудно также, по-видимому, объяснить относительно высокие яркостные температуры излучения ДП по сравнению с сопутствующими всплесками III типа, так как согласно этой модели только небольшая часть всех ленгмюровских волн, генерируемых быстрыми электронами, может трансформироваться в ДП, а большая – трансформируется во всплески III типа. Поэтому существенно более интенсивными в этом случае должны быть всплески III типа.

Магнитное расщепление излучения, изученное в [16], позволяет в принципе получить ДП и даже тройные всплески. В данном случае это явление связано с плазменными волнами на плазменной и гибридной частотах. Правда, для этого необходимы несколько большие значения магнитного поля: 2 Гс на 25 МГц и 10 Гс на 60 МГц. Это можно, по-видимому, принять, если считать, что такие поля имеются в плазменных неоднородностях. С наличием плазменных неоднородностей связывал ДП и В. В. Железняков [17].

По нашему мнению, ключевым свойством ДП для понимания их природы является скорость их частотного дрейфа. Как уже отмечалось неоднократно (см., например, [12]), соответствующая ей линейная скорость движения источника ($1 \div 2 \cdot 10^9$ см/с) отличается от характерных скоростей в корональной плазме: тепловой скорости электронов и ионов, альфвеновской скорости, скоростей источников всплесков II и III типа. Мы хотим обратить внимание на то, что эта скорость близка к фазовой скорости быстрых магнито-звуковых волн (М, рис. 10), у которых она совпадает с групповой скоростью. В отличие от других волн эти волны могут генерироваться пучками частиц (электронов или протонов) вследствие черенковского резонанса $v_{\text{част}} = v_{\phi}$ (где $v_{\text{част}}$ и v_{ϕ} – скорость частиц и фазовая скорость волны соответственно) аналогично тому, как при всплесках III типа генерируются ленгмюровские волны. Но, имея групповую скорость равную фазовой, эти волны сопровождают пучок и поэтому могут в течение длительного времени получать от него энергию. Трансформируясь далее в поперечные волны, они проявляют себя как дрейфующие пары. Значения частоты ω и волнового числа k этих волн находим, приравнявая фазовую скорость $v_{\phi} = \omega/k$ к групповой скорости $v_{gp} = d\omega/dk$ быстрых магнито-звуковых волн с законом дисперсии [18]

$$\omega = \omega_{Be} \frac{k^2 c^2}{\omega_{pe}^2 + k^2 c^2},$$

где ω_{Be} , ω_{pe} – соответственно электронная циклотронная и ленгмюровская плазменная частоты; c – скорость света. В итоге частота этих волн равна

$$\omega = \omega_{Be}/2,$$

а их волновое число –

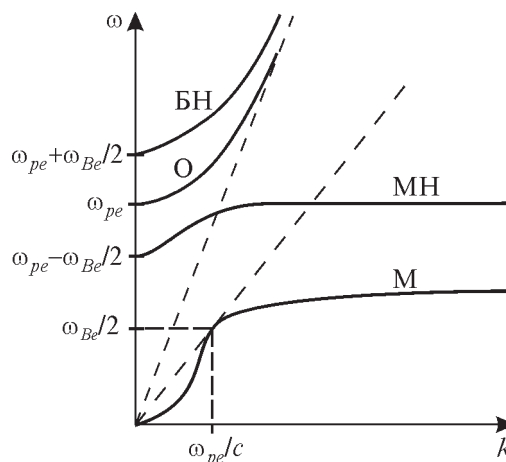


Рис. 10. Дисперсионные кривые обыкновенной (О), быстрой необыкновенной (БН), медленной необыкновенной (МН) и магнито-звуковой (М) волн в плазме ($\omega_{pe} \gg \omega_{Be}$)

$$k = \omega_{pe}/c.$$

При этом значение скоростей будет

$$v_{\phi} = v_{gp} = \frac{\omega_{Be}}{2\omega_{pe}} c.$$

Для магнитного поля $B = 1 \div 2$ Гс (величина магнитного поля в короне $B \approx 0.5$ Гс на высотах, соответствующих частоте излучения) получаем значение скоростей, близкое к линейной скорости дрейфа ДП. Волны с другими частотами и, соответственно, волновыми числами отстают (при $k > \omega_{pe}/c$) или обгоняют (при $k < \omega_{pe}/c$) частицы пучка, и поэтому энергия, связанная с этими волнами, будет существенно меньше. Трансформация может происходить при взаимодействии быстрых магнито-звуковых волн с ленгмюровскими волнами, которые генерируются электронами, ответственными за всплески III типа. И это действительно возможно, если вспомнить тот факт, что в подавляющем большинстве ДП наблюдаются во время бурь всплесков III типа и, более того,

довольно часто они видны на фоне всплесков III типа. Элементарные процессы, в которых появляются поперечные волны, следующие: $l + M = t$ и $l + M = t + M$. При чем под t можно подразумевать не только обыкновенные (О), но и быстрые необыкновенные волны (БН), так как для их образования частота M -волн $\omega_{Be}/2$ достаточна. Две компоненты ДП могут быть как волнами одного типа, например, обыкновенными волнами, но с разными частотами (одна рождается в процессе $l + M = t$ с частотой $\omega_t = \omega_{pe} + \omega_{Be}/2$, а вторая – с частотой, близкой к ω_{pe} , в процессе $l + M = t + M$), так и разными волнами: быстрой необыкновенной с частотой $\omega_t = \omega_{pe} + \omega_{Be}/2$ и волновым числом $k \approx 0$, а также обыкновенной волной с этой же частотой, но с большим значением волнового числа. В обоих случаях разница в групповых скоростях приводит к появлению двух компонент из-за запаздывания одной волны по отношению к другой (первой компонентой в ДП должна быть обыкновенная волна, так как у нее больше групповая скорость). Для того чтобы понять причину появления ДП с положительным и отрицательным дрейфом, следует предположить существование областей неоднородности плазмы в солнечной короне, проходя через которые пучки частиц становятся источниками излучения с положительным или отрицательным частотным дрейфом, в зависимости от знака градиента плотности,

$$\frac{df_{pe}}{dt} = \frac{df_{pe}}{dn} \frac{dn}{dr} v,$$

и считать, что излучение происходит на частоте близкой к плазменной

$\omega_{pe} = 2\pi f_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n}{m}}$ (где e , m – заряд и масса электрона, n – плотность плазмы солнечной короны, v – скорость пучка частиц). Конечно, этот эффект может быть связан и с неоднородностью магнитного поля, но для его реализации необходимы

большие вариации магнитного поля. Продольные размеры областей неоднородности определяют полосу частот, в которой наблюдаются ДП. Мы надеемся, что более детальный анализ этой модели объяснит установленные нами функциональные зависимости между параметрами всплесков.

Заключение

Нами приведены результаты наблюдений всплесков ДП в диапазоне частот 10 ÷ 30 МГц. На большом статистическом материале определены параметры этих всплесков и их функциональные зависимости. Если длительности компонент и временное запаздывание между ними в основном такие же, как сообщалось ранее, то скорости дрейфа “прямых” и “обратных” всплесков отличаются как по величине, так и по распределению всплесков по абсолютным значениям. Обнаружены также существенно разные распределения частоты появления “прямых” и “обратных” всплесков в декаметровом диапазоне – “прямые” всплески более равномерно распределены по частоте (по крайней мере до 15 МГц), в то время как число “обратных” очень быстро уменьшается ниже 20 ÷ 23 МГц. Мы получили существенно разную функциональную зависимость от частоты скоростей дрейфа “прямых” и “обратных” всплесков. По-видимому, зависимость плотности потока излучения от частоты для этих всплесков также различна. По нашему мнению, механизмы генерации обоих типов всплесков, скорее всего, одни и те же, а вот условия генерации могут быть различными.

В работе предлагается новый механизм генерации всплесков, основанный на возбуждении пучками частиц (электронов или протонов) быстрых магнитозвуковых волн со значениями фазовых скоростей, равными их групповым скоростям. Такие волны могут эффективно возбуждаться быстрыми частицами и отбирать от них значительную энергию. Взаимодействие этих волн с ленгмюровскими волнами приводит к образованию БН и О волн в про-

цессах $l + M = t$, $l + M = t + M$. Различные групповые скорости этих волн объясняют появление компонент ДП. Для объяснения эффекта “прямых” и “обратных” всплесков необходимо, по-видимому, предположить существование в солнечной короне областей неоднородности с положительным и отрицательным градиентами плотности. Дальнейшие наблюдения, анализ данных и теоретическое рассмотрение предложенной модели позволит продвинуться в понимании явления ДП.

Благодарности

Работа была частично выполнена в рамках INTAS проекта 03-5727. В. Н. Мельник, А. А. Коноваленко и В. В. Доровский выражают признательность Институту космических исследований Австрийской академии наук (г. Грац) за оказанное гостеприимство во время их пребывания в институте.

Литература

1. Roberts J. A. Evidence of Echoes in the Solar Corona from a New Type of Burst // *Aust. J. Phys.* – 1958. – Vol. 11. – P. 215-234.
2. De la Noe J., Moller-Pedersen B. Relationship between Drift Pair Bursts and Decameter Type III Solar Radio Emission // *Astron. Astrophys.* – 1971. – Vol. 12. – P. 371-378
3. Suzuki S., Gary D. E. Position and Polarization of Solar Drift pair Bursts // *Proc. Astron. Soc. Australia.* – 1979. – Vol. 3. – P. 379-383.
4. Ellis G. R. A. Fine Structure in the Spectra of Solar Radio Bursts // *Aust. J. Phys.* – 1969. – Vol. 22. – P.177-188.
5. Moller-Pedersen B., Smith R. A., Mangeney A. A. Theory of a Solar Radio Burst: The Drift Pair // *Astron. Astrophys.* – 1978. – Vol. 70. – P. 801-813.
6. Абринин Э. П., Базелян Л. Л., Гончаров Н. Ю., Зайцев В. В., Зиничев В. А., Левин Б. Н., Рапорт В. О., Цыбко Я. Г. Некоторые результаты наблюдений солнечных радиовсплесков типа “дрейфующие пары” вблизи частот 25 и 12.5 МГц. // *Астрономический журнал.* – 1977. – Т. 34, Вып.1. – С. 146-157.
7. Braude S. Ya., Megn A. V., Riabov V. P., Sharykin N. K., Zhuk I. N. Decametric Survey of Discrete Sources in the Northern Sky. I – The UTR-2 Radio Telescope: Experimental Techniques and Data Processing // *Astrophys. & Space Sci.* – 1978. – Vol. 54, No. 1. – P. 3-36.
8. New Digital Spectrometers for Ground Based Decameter Radio Astronomy/ Kleewein P., Rosolen C., Lecacheux A. / Edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux.: In *Planetary Radio Emissions IV.* – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 1997. – P. 349-358.
9. Konovalenko A. A. Ukraine Decameter Waves Radio Astronomy Systems and Their Perspectives // *Radio Astronomy at Long Wavelength, Geophysical Monograph.* – 2000. – Vol. 119. – P. 311-319.
10. New frontiers in decameter radio astronomy/ Rucker H. O., Lecacheux A., Konovalenko A. A., Leitner M. / Edited by H. O. Rucker, M. L. Kaiser, Y. Leblanc.: In *Planetary Radio Emissions V.* – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2001. – P. 31-42.
11. Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Станиславский А. А., Рукер Х. О., Абринин Э. П., Доровский В. В., Захаренко В. В., Лисаченко В. Н., Буджада М. Я., Лекашо А., Зайцев В. В., Розоллен М. Г. Обнаружение солнечных всплесков II типа в декаметровом диапазоне длин волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №3. – С. 237-247.
12. Solar Radio Storms/ Melrose D. B. / Edited by Benz A. O., Zlobec P. / *CESRA Workshop #4, Committee of European Solar Radio Astronomers.* – 1982. – P. 182-218.
13. McConnell D. Fine Spectral Structure of Solar Radio Storms // *Proc. Astron. Soc. Australia.* – 1980. – Vol. 4. – P. 64-67.
14. Riddle A. C. On the Observation of Scattered Radio Emission from Sources in the Solar Corona // *Solar Phys.* – 1974. – Vol. 35. – P. 153-169.
15. Зайцев В. В., Левин Б. Н. О механизме генерации солнечных радиовсплесков типа “дрейфующие пары” // *Астрономический журнал.* – 1978. – Т.55, Вып.2. – С. 390-398.
16. Ellis G. R. A. & McCulloch P. M. Frequency Splitting of Solar Radio Bursts // *Aust. J. Phys.* – 1967. – Vol. 20. – P. 583-594.
17. Железняков В. В. О происхождении всплесков солнечного радиоизлучения в метровом диапазоне волн // *Астрономический журнал.* – 1965. – Т. 42, Вып. 2. – С. 244-252.
18. Ахизер А. И., Ахизер И. А., Половин Р. В., Ситенко А. Г., Степанов К. Н. *Электродинамика плазмы.* – М.: Наука, 1974. – 719 с.

**Сонячні сплески типу “дрейфуючі пари”
в декаметровому діапазоні довжин хвиль****В. М. Мельник, О. О. Коноваленко,
В. В. Доровський, Е. П. Абранін,
В. М. Лісаченко, Х. О. Рукер,
А. Лекашо**

У цій статті повідомляється про результати спостереження сонячних сплесків типу “дрейфуючі пари” на радіотелескопі УТР-2 під час шумової бурі 13-15 липня 2002 р. Використання нової реєструючої апаратури з високим часовим та частотним розділенням дозволило одержати нову інформацію про структуру та особливості цих сплесків.

Наводяться результати статистичного аналізу більш ніж 700 дрейфуючих пар окремо для “прямих” та “зворотних” сплесків. Відзначається, що “прямі” та “зворотні” сплески мають низку схожих параметрів, таких як часова затримка між елементами пари, тривалість одного елемента, миттєва ширина смуги. Водночас вони мають суттєві відмінності, найперш, у швидкості частотного дрейфу. Так, середнє значення швидкості частотного дрейфу для “прямих” сплесків дорівнює 0.8 МГц/с, а для “зворотних” – 2 МГц/с. Знайдено емпіричні залежності потоку випромінювання та швидкості частотного дрейфу від частоти, що відрізняються від одержаних раніше. Повідомляється про спостереження незвичайних варіантів дрейфуючих пар, зокрема, Λ -сплесків та сплесків з тонкою частотно-часовою структурою.

В роботі пропонується новий механізм генерації дрейфуючих пар, у якому випромінювання цих сплесків формується у взаємодії ленгмюрівських хвиль l з магнітозвуковими хвилями M , у яких фазова швидкість співпадає з груповою (процеси $l + M = t$, $l + M = t + M$).

**“Drift Pair” Solar Bursts at Decameter
Wavelengths****V. N. Melnik, A. A. Konovalenko,
V. V. Dorovsky, E. P. Abranin,
V. N. Lisachenko, H. O. Rucker,
and A. Lecacheux**

The solar drift pair bursts observed with the UTR-2 radiotelescope during the noise storm of 13-15 July, 2002 are reported. Using the new back-end facility with high time and frequency resolution has allowed new information on the structure and features of these bursts.

More than 700 drift pairs were analyzed statistically separately for the “forward” and “reverse” bursts. Both “forward” and “reverse” drift pairs are noted to have a number of similar characteristics such as the time delay between their elements, the duration of an element, the instantaneous bandwidth. However, they are essentially different, primarily in the average frequency drift rate. Thus, for the “forward” bursts the average frequency drift rate is 0.8 MHz/s, while for the “reverse” ones it equals 2 MHz/s. The obtained empirical dependencies “flux density vs. frequency” and “drift rate vs. frequency” were found to be different from those currently known. Some unusual drift pair variants observed are reported, in particular, the “hook” bursts and drift pairs with fine time and frequency structure.

A new generation mechanism of drift pairs is proposed which implies their emission originating in the interaction between the Langmuir waves l and the magneto-sonic waves M having equal phase and group velocities (the processes $l + M = t$, $l + M = t + M$).