

## Исследования радиоизлучения Солнца в Радиоастрономическом институте НАН Украины

В. Н. Мельник

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

*Статья поступила в редакцию 12 августа 2005 г.*

В статье представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований радиоизлучения Солнца в декаметровом диапазоне длин волн, которые проводились на протяжении более сорока лет сначала в радиоастрономических отделах Института радиофизики и электроники АН УССР, а затем в Радиоастрономическом институте НАН Украины. Самый большой в мире радиотелескоп УТР-2 (п. Граково, РИ НАНУ) позволяет проводить наблюдения с наилучшим временным и частотным разрешением и рекордной чувствительностью. Это дало возможность получать уникальные данные при исследовании известных явлений и открыть новые. Результаты широко представлены в авторитетных мировых специализированных журналах и признаны в научном мире.

### Введение

Можно считать, что солнечные исследования в РИ НАН Украины (а ранее в радиоастрономических отделах Института радиофизики и электроники АН УССР) начались с работы Басса и Брауде [1], опубликованной в 1957 г. и посвященной исследованию возможности радиолокации Солнца. В начале 60-х гг. прошлого столетия в п. Граково под Харьковом начал работать широкополосный радиотелескоп в диапазоне частот  $20 \div 40$  МГц, который позволил проводить наблюдения радиоизлучения Солнца. В начале 70-х гг. с введением в эксплуатацию крупнейшего в мире декаметрового радиотелескопа УТР-2 эти наблюдения стали регулярными, а полученные результаты – во многом приоритетными. Такая ситуация сохраняется и на сегодняшний день благодаря постоянной, кропотливой работе сотрудников отделов декаметровой радиоастрономии и обслуживающего персонала радиотелескопа. Созданная в последнее время новая регистрирующая аппаратура позволила полу-

чать данные на новом качественном уровне и открыть явления, до сих пор не наблюдавшиеся в декаметровом диапазоне длин волн.

Теоретические работы по солнечной тематике в 60-70 гг. были посвящены созданию моделей отражения радиолокационных сигналов в короне Солнца и связаны с именами Гордона [2] и Герасимовой [3]. С середины 80-х гг. в институте ведутся теоретические исследования механизмов излучения спорадического радиоизлучения Солнца и процессов, которые их сопровождают.

В настоящем обзоре в основном будут представлены результаты исследования радиоизлучения Солнца, которые были получены в РИ НАНУ и приобрели широкую известность в научном мире.

### Радиотелескопы

Наблюдения Солнца в декаметровом диапазоне длин волн начались после сооружения в 1962 г. широкополосного ( $20 \div 40$  МГц) меридианного интерферометра, состоявшего

из двух прямоугольных решеток ( $176 \times 16$  м), каждая из 128 диполей [4, 5], и Т-образного радиотелескопа УТР-1, работавшего в диапазоне частот  $10 \div 25$  МГц [6, 7]. Наблюдательные возможности в диапазоне  $10 \div 30$  МГц намного возросли с вводом в строй в 1970 г. радиотелескопа УТР-2 [8, 9]. Его Т-образная антенная система состоит из северной, южной и западной решеток, каждая включает в себя 4 автономных секции. Первые две решетки размером  $900 \times 54$  м, ориентированные вдоль меридиана, имеют по 720 полуволновых диполей, а западная ( $900 \times 40$  м), состоящая из 600 диполей, вытянута вдоль параллели. В антенне “север-юг” формируется пять разнесенных на  $25'$  по склонению лучей, размером  $13^\circ \times 25'$  ( $13^\circ$  – прямое восхождение,  $25'$  – склонение). Они перемножаются с диаграммой направленности западной антенны и образуют 5 карандашных лучей шириной  $25'$  при наблюдении в зенит на частоте 25 МГц.

В наблюдениях Солнца первоначально (до конца 90-х гг.) использовались два типа радиоспектрографов – десятиканальный спектрограф параллельного обзора в полосе частот  $10 \div 25$  МГц с чувствительностью  $\approx 0.1$  с. е. п. ( $1 \text{ с. е. п.} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$  – солнечная единица потока), динамическим диапазоном  $\approx 40$  дБ, полосой пропускания 5 кГц, постоянной времени  $\approx 0.1$  с и трехканальный спектрограф параллельно-последовательного обзора с чувствительностью  $\approx 100$  с. е. п., полосой пропускания  $\approx 10$  кГц, постоянной времени 0.01 с. В конце 90-х гг. был разработан 60-канальный спектрометр с полосой частот от 3 до 10 кГц. Центральная частота каждого канала этого спектрометра выбирается в диапазоне  $10 \div 30$  МГц в зависимости от наблюдательной программы. Спектрометр имеет временное разрешение до 10 мс, чувствительность  $10^{-25} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$  и динамический диапазон 40 дБ. В период с 1999 по 2002 г. проводились совместные наблюдения солнечного радиоизлучения сотрудниками РИ НАНУ, Института космических исследований (Грац, Австрия), Медонской обсерватории (Париж, Франция) на радиотелескопе УТР-2 с использованием цифрового спектрального поляриметра. Цифровой

спектральный поляриметр – двухканальный широкополосный цифровой приемник для регистрации и обработки сигналов космического происхождения. Его основные характеристики представлены в таблице.

**Таблица.** *Параметры цифрового спектрального поляриметра*

Мгновенная полоса частот, МГц	12
Временное разрешение, мс	2
Фиксированное разрешение по частоте, кГц	12
Динамический диапазон, дБ	72

Для построения карт радиоизлучения Солнца в 70-90 гг. использовался радиогелиограф с чувствительностью  $\approx 0.1$  с. е. п. на частотах 16.7, 20 и 25 МГц с полосой частот от 1 до 10 кГц.

Поляризация солнечного радиоизлучения измерялась на антенне УРАН-1 (г. Змиев, Украина) с использованием приемников, у которых полоса частот  $\approx 100$  Гц и постоянная времени  $\approx 0.1$  с [10].

## Наблюдения

### *Структура внешней короны Солнца*

Изучение внешней короны Солнца в 70-80 гг. осуществлялось посредством ее просвечивания дискретными источниками [11-14]. Наблюдения покрытия коронной источника 3С144 на частотах 20, 25, 31 и 38 МГц показали, что корона рассеивает излучение не как сферически симметричная среда, а как эллиптическая. Кроме того, как оказалось, корона состоит из вытянутых “от Солнца” радиальных неоднородностей, которые концентрируются к экваториальной плоскости. Из наблюдений следует, что на расстояниях  $(10 \div 20) \cdot R_\odot$  ( $R_\odot = 7 \cdot 10^{10}$  см – радиус Солнца) следует ожидать повышенный уровень неоднородностей, связанный с тем, что на этих расстояниях солнечный ветер испытывает переход от дозвукового

к сверхзвуковому режиму течения [14]. Было установлено, что в короне при расположении источника на малых угловых расстояниях от Солнца рассеяние излучения источника преобладает над рефракцией, причем с ростом углового расстояния рассеяние в короне увеличивается [15].

**Декаметровое радиоизлучение  
спокойного Солнца**

В наблюдениях 1976-1977 гг. были получены 24 карты спокойного Солнца. Их сопоставление обнаруживает вариации распределений яркости от суток к суткам. На рис. 1 приведены карты для двух последовательных дней. Видны существенные изменения в радиоизображениях. Более того, даже на картах, снятых с шагом в 30 и 5 мин, изменения остаются существенными [16]. Наблюдения показывают, что имеются интенсивные флуктуации потока Солнца на частотах вблизи 25 МГц с квазипериодами от 5 до 25 мин. Одно из возможных объяснений – наличие на высотах до  $R_{\odot}$  цугов магнито-

звуковых волн с периодами 10 мин и скоростью 100 км/с, которые переносят энергию от нижних слоев короны в более высокие слои.

Измерения полного потока и яркостной температуры излучения спокойного Солнца, проведенные в 1976-1977 гг., показали, что поток составлял 0.1 с. е. п. в 1976 г. и 0.08 с. е. п. в 1977 г., а яркостная температура –  $3.3 \cdot 10^5$  и  $2.8 \cdot 10^5$  К соответственно.

Размеры Солнца на декаметровых волнах различны в экваториальной и полярной областях – 42 и 36' соответственно. Это, по-видимому, связано с эффектами рассеяния в короне Солнца. Если говорить о долготной зависимости рассеяния излучения, то здесь имеются данные как в пользу увеличения рассеяния от центра диска к лимбу, так и наоборот. Согласно всей совокупности наблюдательных данных, полученных посредством наблюдения просвечивания короны космическими источниками [11-15], спорадического радиоизлучения [17] и излучения спокойного Солнца, рассеяние излучения происходит, по-видимому, на радиально вытянутых неоднородностях в короне Солнца.

**Медленноменяющаяся компонента  
декаметрового излучения Солнца**

В сантиметровом и дециметровом диапазонах наблюдаются области повышенного радиоизлучения, обладающие такими особенностями: время их жизни составляет не менее нескольких дней, они участвуют в собственном движении Солнца, их радиоизлучение является тепловым. Эти источники отождествляются с корональными конденсациями, а их совокупность образует медленноменяющийся компонент солнечного радиоизлучения. В метровом диапазоне эти компоненты очень слабые. В литературе в 1977 г. появились сообщения, что в Кларк Лейке (США) обнаружены медленноменяющиеся компоненты в декаметровом диапазоне длин волн. Проведенные на радиотелескопе УТР-2 наблюдения на частотах 20 и 25 МГц с помощью радиогелиографа не выявили таких компонент [18, 19]. Регистрировались только источники нетеплового излучения [20] и случайные искажения сканов, которые нельзя отнести на счет медленноменяющегося компонента.

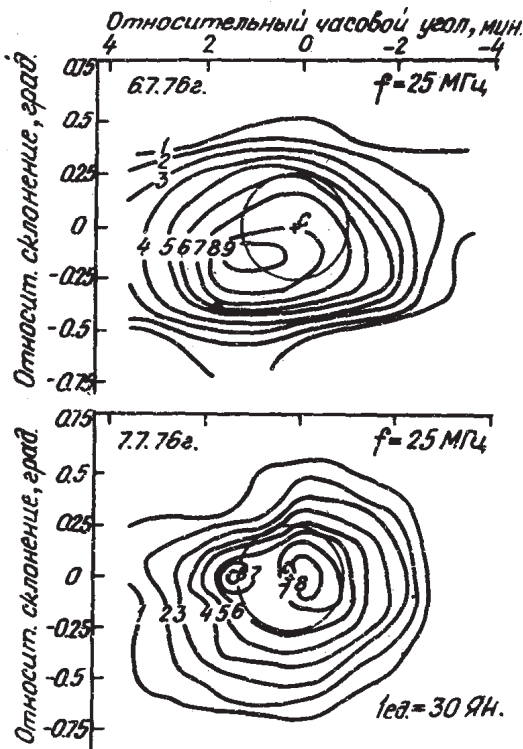


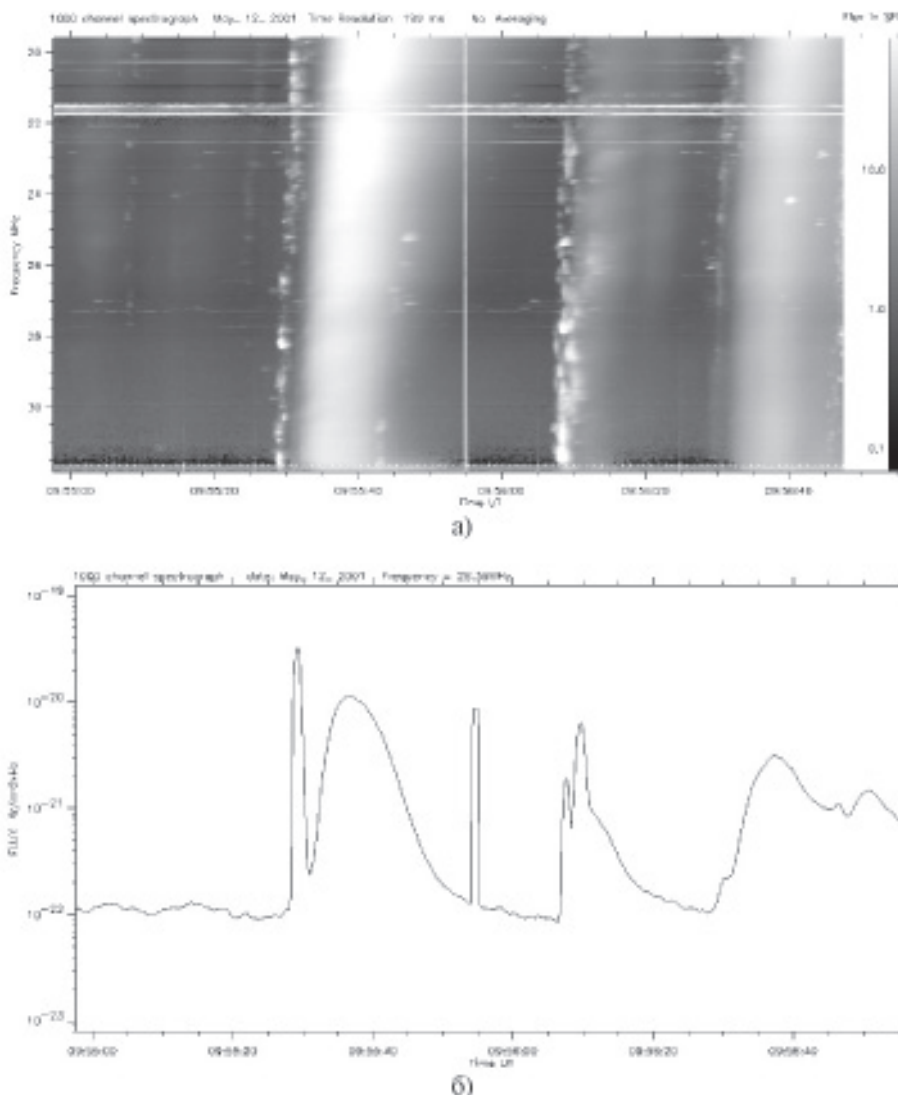
Рис.1. Радиокарты спокойного Солнца 6 и 7 июля 1976 г.

**Всплески III типа**

Всплески III типа являются наиболее ярким проявлением спорадического радиоизлучения Солнца. Этому типу всплесков посвящено большое число работ как наблюдательных, так и теоретических, но, несмотря на это, полной ясности в понимании природы этого явления нет. Поэтому исследованию этих всплесков продолжает уделяться большое внимание в различных диапазонах длин волн – от дециметрового до километрового. На дециметровых волнах всплески III типа имеют некоторые особенности, которых нет на других волнах [21, 22]. Кроме того, УТР-2 обла-

дает уникальными на сегодняшний день параметрами, а наличие спектрометров нового поколения дает возможность получать новые качественные и количественные данные [23], что позволяет надеяться на окончательное решение проблемы этого феномена.

На рис. 2, а показана последовательность пар всплесков Шв-III в диапазоне частот  $20 \div 32$  МГц, наблюдавшаяся 12 мая 2001 г. На рис. 2, б представлен их временной профиль на частоте 28.36 МГц. Из этих рисунков следует, что всплески дрейфуют в сторону меньших частот, а профили всплесков III типа являются гладкими. Это, по-видимому,



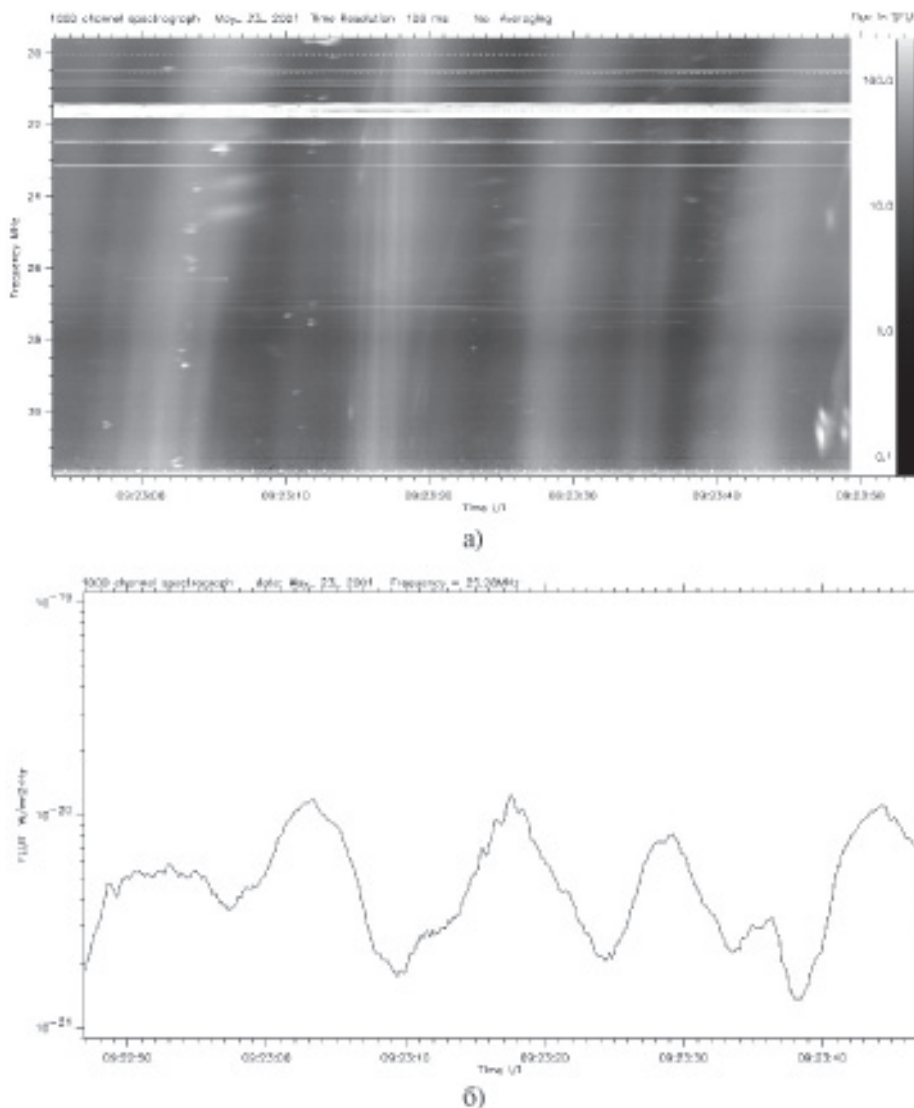
**Рис. 2.** Последовательность пар всплесков Шв-III (12 мая 2001 г.): а) динамический спектр, б) временной профиль

говорит об однородности потоков электронов, которые генерируют эти всплески. У всплесков III типа в области наблюдаемых частот скорость дрейфа около 3 МГц/с и длительность около 10 с. Для всплесков IIIb скорость дрейфа несколько больше (4 МГц/с), а длительность – меньше (3 с). Они также несколько ярче – для всплеска IIIb в 09:55:30 поток излучения достигает величины  $3 \cdot 10^2$  с. е. п., в то время как для всплеска III – всего  $10^2$  с. е. п.

Наряду с обычными всплесками мы наблюдали всплески III типа с тонкой структурой (более 50 в наблюдениях 2001-2002 гг.) [24].

Имеются всплески, состоящие из субвсплесков, которые дрейфуют со скоростями, большими и меньшими скоростей родительского всплеска. Можно выделить такие случаи:

- субвсплески со скоростями больше скорости дрейфа родительского всплеска (см. рис. 3) (максимальное наблюдаемое значение скорости дрейфа около 12 МГц/с);
- субвсплески со значениями скоростей вблизи 1 МГц/с;
- субвсплески со значениями скоростей меньше 100 кГц/с (рис. 4, а);



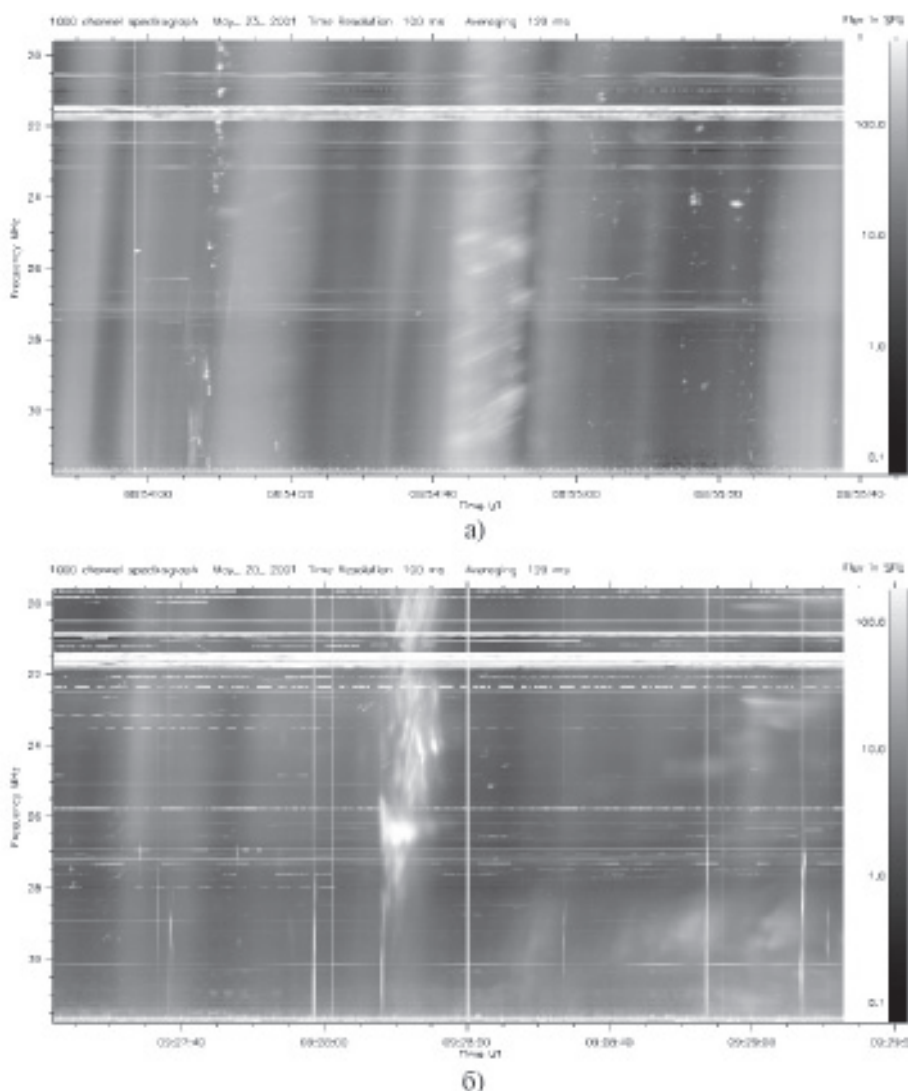
**Рис. 3.** Пример всплеска III типа с тонкой структурой (09:23:16): а) динамический спектр, б) временной профиль

– субвсплески как с положительными, так и с отрицательными значениями скоростей (рис. 4, б).

Ко второй группе можно отнести случаи, когда на всплеске III типа наблюдаются всплески типа “дрейфующая пара” или s-всплески. По-видимому, это не случайное наложение всплесков, излученных из различных областей солнечной короны, так как и дрейфующие пары, и s-всплески резко ограничены рамками всплеска III типа. Длительность субвсплесков, входящих в состав родительского всплеска III типа, составляет приблизительно 1 с. Потоки всплесков

III типа с тонкой структурой имеют средние значения для декаметрового диапазона –  $10^2 \div 10^3$  с. е. п. По нашему мнению, субвсплески связаны с пучками частиц с параметрами, отличными от параметров (плотности и/или скорости) потока электронов, ответственного за родительский всплеск.

Тонкоструктурные частотные особенности всплесков III типа – это излучение в виде полосок излучения (так называемые стриа-всплески), цепочки которых образуют всплески IIIb [25-27] (рис. 2). Их число увеличивается (начиная с 60 МГц) с понижением частоты наблюдения и достигает макси-



**Рис. 4.** Всплески III типа с тонкой структурой: а) со скоростью меньше 100 кГц/с, б) с положительным и отрицательным значением скорости частотного дрейфа

мума в области  $25 \div 30$  МГц, а затем уменьшается вплоть до 6.25 МГц. Одиночный всплеск имеет длительность около 1 с на частоте 25 МГц, и она растет пропорционально длине волны. Мгновенная ширина одиночного стриа-всплеска около 70 КГц, а скорость частотного дрейфа от высоких частот к низким частотам  $\leq 0.15$  МГц/с. Часто стриа-всплески встречаются в виде расщепления на дублеты и триплеты со средней величиной расщепления около 0.1 МГц. Когда они группируются в цепочки, то образуют всплески Шб, которые предшествуют всплескам Ш типа (рис. 2, а) (однако такая ситуация не всегда имеет место).

Угловые размеры источников Шб и Ш типа практически одинаковы [28, 29], находятся в пределах от 20 до 40'. За время жизни всплесков их размеры не меняются существенным образом. Положения источников всплесков совпадают с точностью до 5', а их высоты в короне составляют  $(0.7 \div 0.8) \cdot R_{\odot}$ .

Исследование гармонической структуры пар Шб–Ш проводилось в работах [30–32], где было показано, что они гармонически связаны – отношение частот в один и тот же момент времени очень близко к 2. Это заключение делалось из сравнения записей в двух октавах на частотах 6.25, 12.5 и 25 МГц.

Одной из важных характеристик всплесков Ш типа является скорость частотного дрейфа. На высоких частотах метрового диапазона она приблизительно равна 100 МГц/с, а в декаметровом – несколько МГц/с. Скорости частотного дрейфа всплесков Ш типа, как показывают наблюдения, зависят от гелиодолготы источника излучения на диске Солнца – большие значения достигаются, когда источник находится в центральной области диска, и меньшие – вблизи лимба [33]. В последнем случае длительность всплесков, наоборот, резко увеличивается. По-видимому, этот эффект связан с тем, что, когда источник находится вблизи лимба, регистрируется вторая гармоника излучения, а когда в центральной области, – первая гармоника. В пользу этого говорят как поляризационные наблюдения, так и тот факт, что на протяжении 11-летнего цикла активности Солнца скорости частотного

дрейфа и длительности всплесков остаются практически неизменными [34].

В работах [35] был обнаружен эффект торможения пучков электронов, который, как считается, является источником всплесков Ш типа. Он связан с тем, что плазменные волны, генерируемые пучком электронов, рассеиваются на ионах тепловой плазмы, выходят из резонанса с пучком, и это приводит к уменьшению его энергии и, как следствие, торможению. Установлено, что этот эффект имеет место для скоростей пучков  $> 0.35c$  ( $c$  – скорость света).

Измерения степени поляризации всплесков Ш типа показали, что при нахождении источника в центральной области диска Солнца степень поляризации составляет величину около 30 %, а ближе к лимбу – около 10 %, что говорит в пользу гипотезы, согласно которой в первом случае генерация происходит на первой гармонике, а во втором случае – на второй. Вместе с тем величина поляризации излучения первой гармоники ниже теоретических значений.

Достаточно редко наблюдаются так называемые диффузные стриа-всплески [17]. По сравнению с обычными стриа-всплесками они имеют большие временные и частотные масштабы. Так, их длительность на частоте 25 МГц – около 10 с и мгновенная полоса частот – 0.12 МГц. Если это расщепленная пара, то расщепление в среднем равно 0.18 МГц. Иногда элементы в расщепленной паре смещены по времени на  $3 \div 5$  с. Если диффузные стриа-всплески группируются в цепочки, то получающийся всплеск (названный Шд) дрейфует со скоростью, равной скорости дрейфа второй гармоники всплеска Ш типа. При перемещении активной области по диску Солнца от центрального меридиана к лимбу за первой цепочкой через некоторое время появляется вторая, менее интенсивная (явление эхо-всплеска), но более продолжительная, а иногда и третья. На средних и больших гелиодолготах они сливаются, образуя один диффузный всплеск. В пользу гипотезы эхо-всплесков говорят и гелиографические наблюдения, указывающие на перемещение источника излучения вглубь короны при больших гелиодолготах активных областей [36].

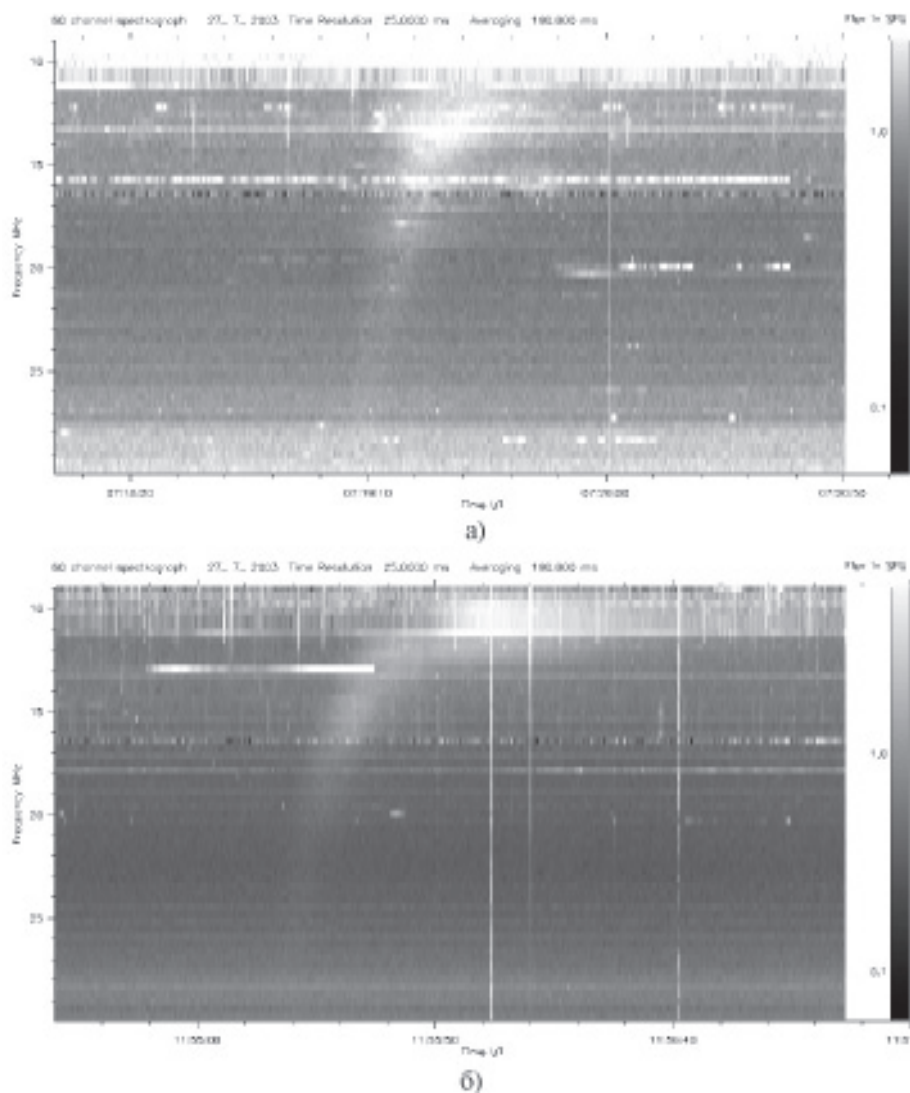
Временной профиль эхо-всплесков отличается существенным образом от временного профиля обычных всплесков – передний фронт более пологий, чем задний. Квазипериодические структуры солнечных всплесков IIIд типа с эхо-компонентами исследовались в работе [37].

К классу всплесков III типа относят и инвертированные U- и J-всплески. Примеры таких всплесков, наблюдавшихся 27 июля 2003 г., показаны на рис. 5 [38]. Точка поворота всплеска находится на предельно низких наблюдавшихся частотах в окрестности 10 МГц. Это означает, что если такие всплески порождаются электронами, распростра-

няющимися в солнечных магнитных арках, то их высота в этих случаях превышает  $R_{\odot}$ .

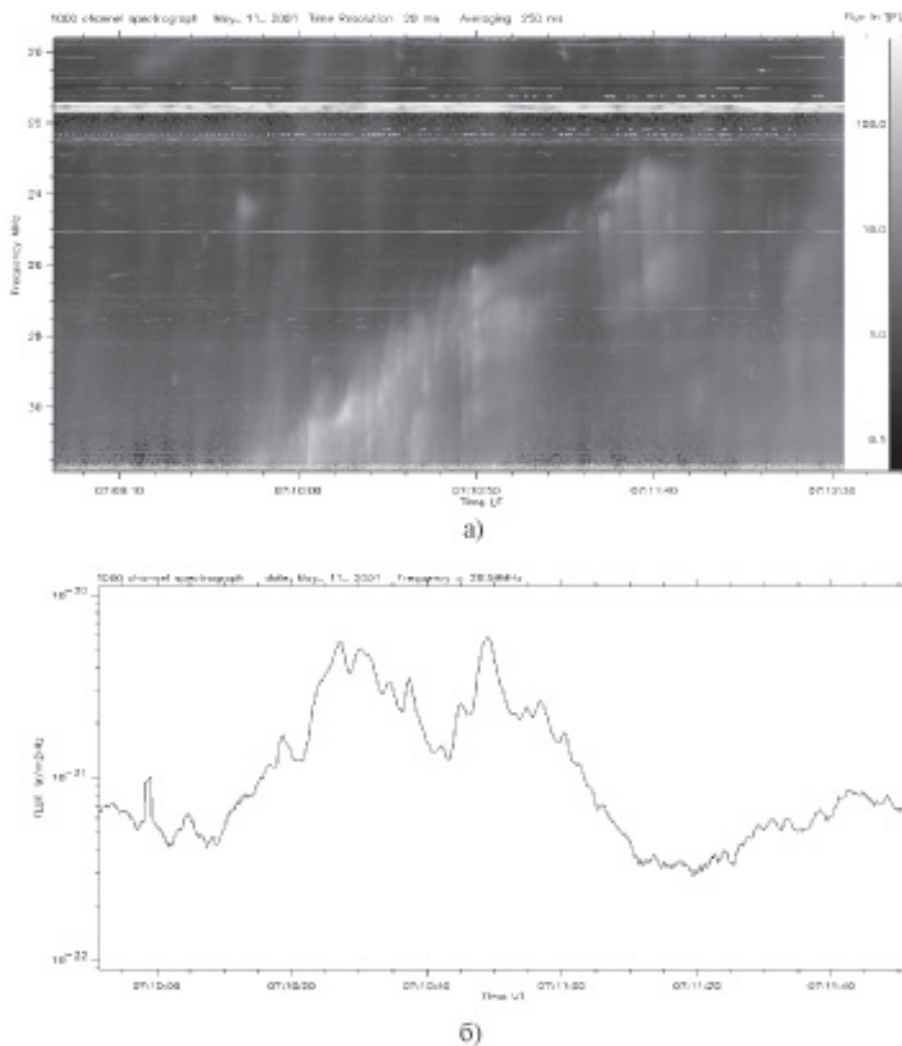
### *Всплески II типа*

В 2001-2002 гг. мы впервые наблюдали всплески II типа в диапазоне частот 10 ÷ 30 МГц (рис. 6, 7) [39, 40]. Всплески II типа в декаметровом диапазоне дрейфуют со скоростями 30 ÷ 70 кГц/с. Их мгновенная полоса составляет 1 ÷ 3 МГц. Они, как и на более высоких частотах, состоят из полос (lanes) (рис. 6). Впервые в наблюдениях на УТР-2 было обнаружено, что они имеют тонкую структуру в виде субвсплесков, которые дрейфуют как в область высоких час-



**Рис. 5.** U-всплески (а) и J-всплески (б) на декаметровых волнах

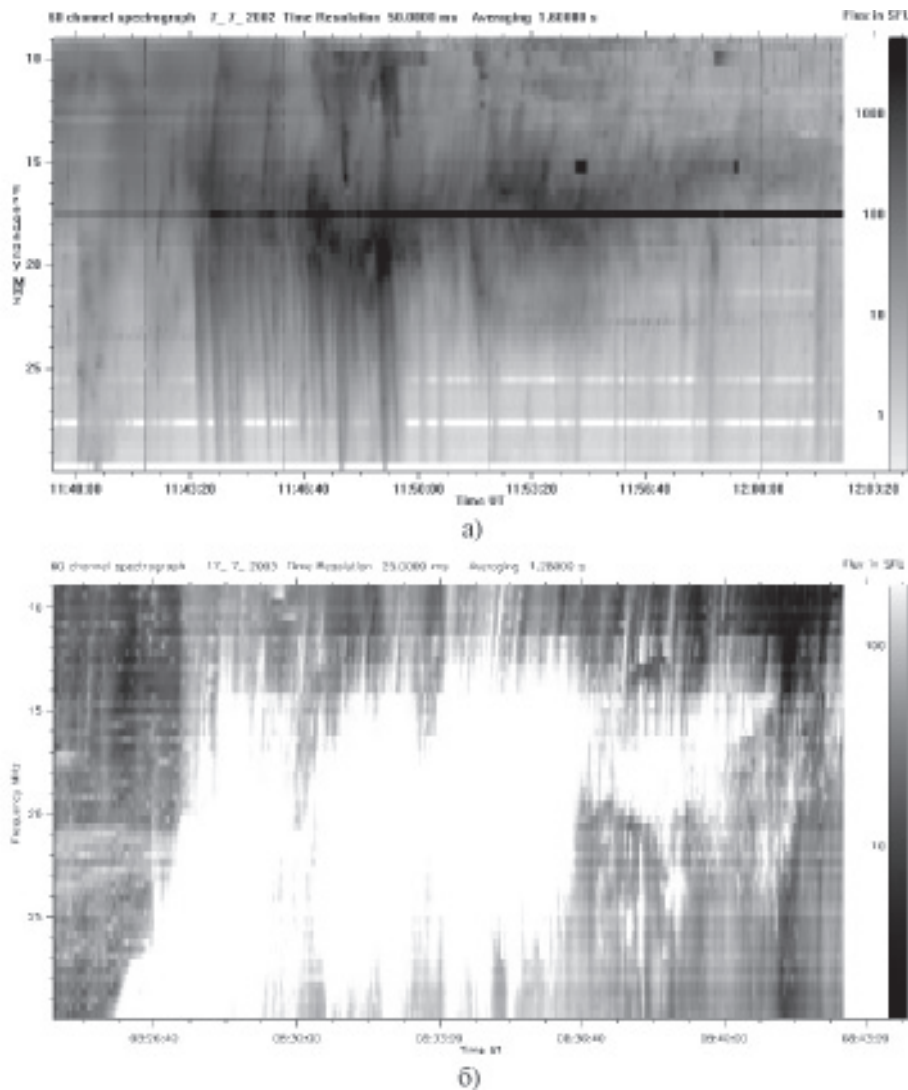




**Рис. 6.** Всплеск II типа (а) и его временной профиль на частоте 28.59 МГц (б)

тот, так и в область низких частот. Это может означать, что пучки электронов ускоряются в обе стороны на фронте ударной волны, т. е. движутся как от Солнца, так и к Солнцу. Наблюдавшиеся скорости дрейфа субвсплесков находятся в пределах значений  $1 \div 3$  МГц/с, а их длительность равна  $1 \div 2$  с. Всплеск II типа с елочной структурой (рис. 7, а), зарегистрированный 7 июля 2002 г., имел среднюю скорость дрейфа приближенно равную нулю, а это означает, что соответствующая ударная волна двигалась параллельно поверхности Солнца. Как видно из рис. 7, а, излучение “хребта” (backbone) имеет волнообразный характер, который мы связываем с пересечением ударной волной

корональных структур. По амплитуде модуляции и характерной длине волнообразного изменения можно оценить характерные параметры этих структур. Очень похожий всплеск мы наблюдали 17 июля 2003 г. [38]. Его средняя скорость была 25 кГц/с, и он, также как и предыдущий всплеск, имел волнообразную форму излучения “хребта”. Субвсплески, дрейфующие в область высоких частот, имеют скорости дрейфа, в несколько раз превышающие скорости дрейфа субвсплесков, движущихся в область низких частот. Больше у них и полная длительность, что указывает, по-видимому, на различные условия распространения ускоренных электронов по обе стороны от ударной волны.

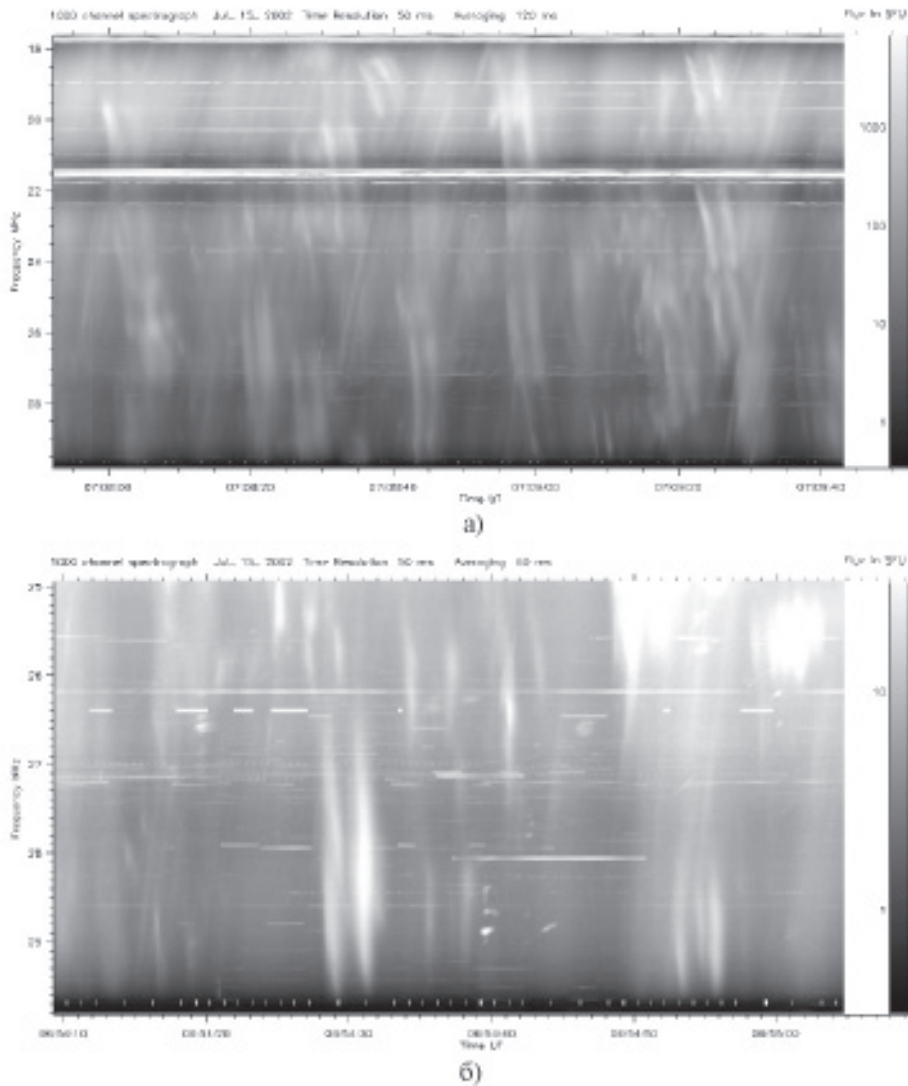


**Рис. 7.** Всплески II типа с елочной структурой и волнообразным излучением “хребта”, наблюдавшиеся 7 июля 2002 г. (а) и 17 июля 2003 г. (б) с помощью цифрового спектрального поляриметра и 60-канального спектрометра соответственно

#### **Всплески типа “дрейфующая пара”**

Эта компонента спорадического радиоизлучения наблюдается в подавляющем большинстве случаев во время бури всплесков III типа и чаще всего в составе бури всплесков типа “дрейфующая пара” (рис. 8, а). Различают как прямые (дрейф от высоких частот к низким частотам), так и обратные (дрейф от низких частот к высоким частотам) (рис. 8, б) дрейфующие пары. Первые наблюдения дрейфующих пар на радиотелескопе УТР-2 можно отнести к 1974 г. Основные свойства этих всплесков, которые обсуждались в работах [41], на более пред-

ставительном наблюдательном материале были подтверждены в 2001–2002 гг. [42]. Так, число прямых и обратных всплесков “дрейфующая пара” приблизительно одинаково. Однако если прямые всплески наблюдаются со стороны больших частот более или менее равномерно до частоты 15 МГц, то обратные всплески – до частоты 25 МГц. Средние скорости дрейфа этих всплесков отличаются – для прямых всплесков средняя скорость 0.8 МГц/с, а для обратных “дрейфующих пар” – 1.6 МГц/с. Ширина распределения всплесков по скоростям дрейфа также различна. Она больше для об-



**Рис. 8.** Буря всплесков типа “дрейфующая пара” (а) и отдельная “дрейфующая пара” (б)

ратных всплесков. Интересно, что у этих всплесков очень большие скорости дрейфа, в то время как прямые всплески типа “дрейфующая пара” имеют иногда очень малые скорости дрейфа. Запаздывание одной компоненты пары относительно другой в обоих случаях примерно одинаково, для прямых всплесков – 1.7 с, а для обратных – 2 с. Длительность каждой компоненты около 1 с для обоих видов всплесков типа “дрейфующая пара”. Потoki большинства всплесков находятся в пределах 5÷100 с.е.п., а полная полоса частот пар составляет 3÷4 МГц. Иногда наблюдаются диффузные пары с длительностью каждой компоненты больше 2 с, пары с тонкой структурой в виде об-

лачков и субвсплесков, а также  $\Lambda$ -всплески (в англоязычной литературе их называют “hook”), которые представляют собой две последовательные пары с разным знаком скорости частотного дрейфа (т. е. прямая и обратная “дрейфующая пара”). Выделенное значение скорости дрейфа может указывать на то, что механизм генерации “дрейфующих пар” связан с возбуждением быстрых магнитозвуковых волн, у которых групповая скорость и фазовая скорость совпадают. В этом случае реализуется, с одной стороны, черенковский резонанс ( $v_\phi = v_n$ , где  $v_\phi$  – фазовая скорость волны, а  $v_n$  – скорость пучка частиц), при котором частицы пучка возбуждают эти волны. А с другой сто-

роны, быстрые магнитозвуковые волны, двигаясь вместе с частицами (когда совпадают групповая скорость волн и скорость частиц,  $v_{гр} = v_n$ ,  $v_{гр}$  – групповая скорость волны) могут длительное время отбирать у них энергию. Дальнейшее взаимодействие с ленгмюровскими волнами, которые возбуждаются быстрыми электронами, дает поперечные волны, регистрируемые как всплески типа “дрейфующая пара”. Ограниченность полосы частот существования “дрейфующей пары” и наличие всплесков как прямых, так и обратных может быть связано с присутствием неоднородностей в корональной плазме.

### Солнечные s-всплески

Солнечные s-всплески, также как и всплески типа “дрейфующая пара”, наблюдаются преимущественно во время бурь всплесков III типа и сами образуют бури s-всплесков (рис. 9, а) [43]. Эти всплески по своим свойствам близки к всплескам типа “дрейфующая пара” и прежде всего по величине скорости частотного дрейфа. Скорость дрейфа для s-всплесков находится вблизи значения 1 МГц/с. Но если у всплесков типа “дрейфующая пара” эта скорость – постоянная величина для данного всплеска, то у s-всплесков она уменьшается с понижением частоты (рис. 9, б). Причем функциональная зависимость от частоты очень близка к зависимо-

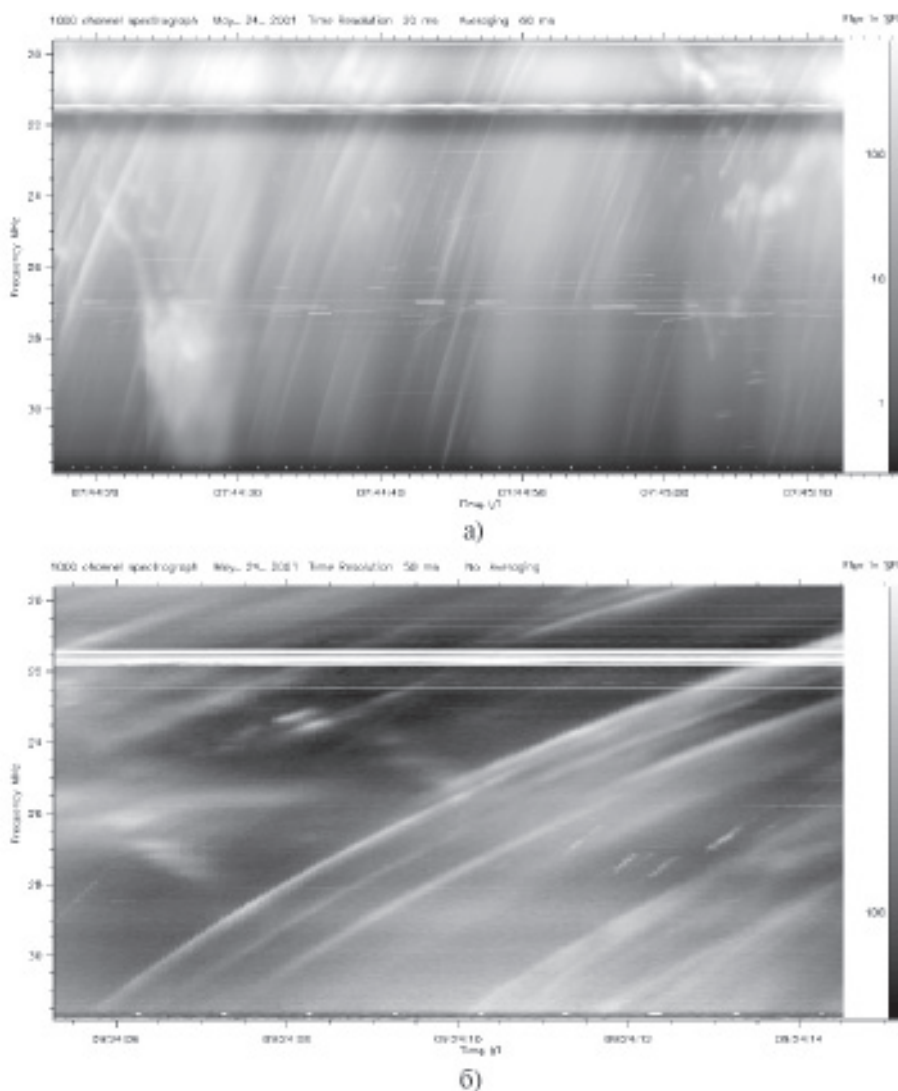


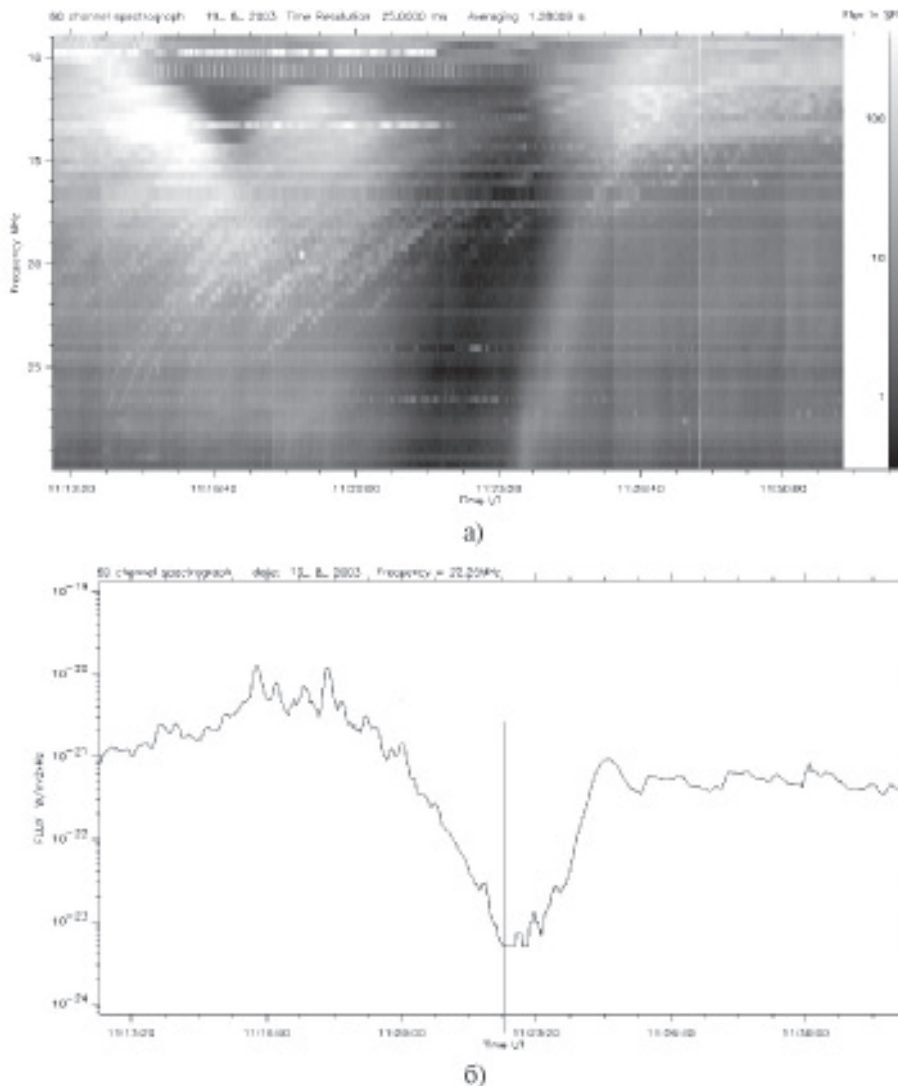
Рис. 9. Буря s-всплесков (а) и дрейф s-всплеска в декаметровом диапазоне (б)

сти скорости дрейфа от частоты для всплесков III типа. Это, по всей видимости, говорит о том, что, как и для всплесков III типа, такая зависимость отражает степень неоднородности короны, т. е. можно говорить, что источник s-всплесков движется в плазме средней короны. По-видимому, s-всплески не встречаются парами и имеют только отрицательный частотный дрейф. Их длительность ( $\approx 0.3$  с) несколько больше, чем в высокочастотной области (около 0.1 с на частотах выше 40 МГц), что можно считать естественным, помня об увеличении длительности всплесков III типа с уменьшением частоты излучения. Механизм излучения s-

всплесков может быть аналогичным механизму излучения “дрейфующих пар”, но реализуется, когда пучки частиц проходят через корональную плазму без неоднородностей.

**Всплеск в поглощении**

В ряде работ наблюдалась область поглощения на фоне спорадического радиоизлучения Солнца, которая дрейфовала от высоких частот к низким с большой скоростью дрейфа. Это явление было названо “всплеск в поглощении” или “всплеск III типа в поглощении”. Все предыдущие наблюдения таких всплесков относились к области частот выше 34 МГц. Мы впервые наблюдали всплеск в поглощении на частотах ниже 30 МГц (рис. 10, а)



**Рис. 10.** Всплески в поглощении (а) и временной профиль одного из них на частоте 22.25 МГц (б)

19 августа 2003 г. в 11:19:10-11:25:00 UT [44]. Более того, мы наблюдали его эволюцию во всей области частот от 10 до 30 МГц. Этот всплеск дрейфовал со скоростью около 120 кГц/с, что соответствует линейной скорости движения области поглощения, превышающей 2000 км/с. Скорость дрейфа всплеска II типа, на фоне которого был виден всплеск в поглощении, была в несколько раз меньше,  $\approx 30$  кГц/с. Примерно за 4 мин до появления всплеска (с 11:15:00 до 11:18:20 UT) в диапазоне частот 10÷14 МГц наблюдалась еще одна область в поглощении, о дрейфе которой трудно сказать что-либо определенное. Временной профиль области поглощения (рис. 10, б) показывает, что передний фронт всплеска в поглощении более пологий, чем задний, –  $\tau_{\text{п}} \approx 1.5\tau_3 = 40 \div 50$  с. На сегодняшний день нет определенной точки зрения на природу этого явления. Высокая скорость дрейфа всплеска в поглощении только добавляет неопределенности, так как она является слишком высокой для перемещения большой массы вещества – вероятного объекта, поглощающего излучение.

### Теоретические исследования

Как уже говорилось выше, наиболее изученной компонентой солнечного радиоизлучения являются всплески III типа. Имеется огромное количество данных наблюдений этих всплесков в широком диапазоне частот от нескольких сотен МГц до 10 кГц. Установлено, что источником этих всплесков являются потоки электронов малой плотности  $n'$  ( $n' \ll n$ , где  $n$  – плотность плазмы солнечной короны), которые движутся с постоянной скоростью. Общепринятым считается, что среднее ее значение  $v_0 = 0.3c$ . Всплески III типа, которые ассоциируются с электронами со скоростями меньше  $0.2c$  и больше  $0.6c$  не наблюдались. Вследствие большой яркостной температуры излучения механизм генерации всплесков, несомненно, является коллективным, плазменным. В данном случае он заключается в возбуждении быстрыми электронами ленгмюровских волн  $l$ , которые затем трансформируются в поперечные волны  $t$  в процессах  $l + i = t + i$

и  $l + l = t$ , испуская наблюдаемое излучение на основной ( $f_t = f_{\text{pe}}$ , где  $f_{\text{pe}} = \frac{\omega_{\text{pe}}}{2\pi} = \sqrt{\frac{e^2 n}{\pi m}}$  – плазменная частота,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электронов соответственно) и второй гармонике ( $f_t = 2f_{\text{pe}}$ ). Несмотря на качественное понимание физики явления, самосогласованной количественной теории всплесков III типа на сегодняшний день нет. Одна из основных трудностей заключается в адекватном описании разлета ограниченного в пространстве потока быстрых электронов, когда необходимо учитывать в кинетическом приближении как возбуждение ленгмюровских волн, так и их обратное воздействие на быстрые электроны. По сути, необходимо решать квазилинейную систему кинетических уравнений в частных производных [45-48, 50, 51]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{4\pi^2 e^2}{m^2} \frac{\partial W}{\partial v} \frac{\partial f}{\partial v},$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\pi \omega_{\text{pe}}}{n} v^2 W \frac{\partial f}{\partial v},$$

где  $f(v, x, t)$  – функция распределения быстрых электронов,  $W(v, x, t)$  – спектральная плотность энергии ленгмюровских волн с учетом начальных и/или граничных условий. В общем случае аналитическое решение такой системы не представляется возможным. Однако если процесс взаимодействия электронов с ленгмюровскими волнами является “быстрым”, т. е. характерное время взаимодействия  $\tau_{\text{кв.р.}} = (\omega_{\text{pe}} n'/n)^{-1}$  (время квазилинейной релаксации) существенно меньше времени разлета  $t$ ,  $\tau_{\text{кв.р.}} \ll t$ , и длительности инжекции  $t_{\text{инж}}$ ,  $\tau_{\text{кв.р.}} \ll t_{\text{инж}}$ , можно перейти от кинетического описания к газодинамическому. На это упрощение впервые указали Рютов и Сагдеев. В этом случае можно считать, что в каждой точке на функции распределения электронов по скоростям вплоть до максимальной скорости  $u(x, t)$  устанавливается плато  $p(x, t)$ . Для этих газодинамических функций  $u(x, t)$  и  $p(x, t)$  (в обычной газовой динамике – это темпе-

ратура, плотность, давление газа) в работах [46-48] были непротиворечивым образом найдены газодинамические уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial t} pu + \frac{\partial}{\partial x} \frac{pu^2}{2} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0.$$

Спектральная плотность энергии при этом находится из уравнений:

$$\frac{\omega_{pe}}{m} \frac{\partial}{\partial v} \frac{1}{v^3} \frac{\partial W_0}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{\partial W_0}{\partial t} = 0, \quad v = u;$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} W_0 = 0, \quad v = u.$$

Были рассмотрены и аналитически решены различные начальные и граничные задачи [46-49, 52-55]. Численное решение системы соответствующих кинетических уравнений показало справедливость газодинамического описания. Основным физический результат заключается в том, что электроны распространяются в плазме в виде нового нелинейного объекта – пучково-плазменного образования [56], аналогичного солитону. Пучково-плазменное образование состоит из электронов и ленгмюровских волн, причем на переднем фронте образования волны генерируются электронами, а на заднем – поглощаются. Пучково-плазменное образование движется с постоянной скоростью без потери энергии. По-видимому, именно такие пучково-плазменные образования и являются источниками всплесков III типа. Они обладают необходимыми свойствами – способностью распространяться на большие расстояния и быть источником излучения, так как входящие в их состав ленгмюровские волны, трансформируясь в поперечные волны в процессах индуцированного рассеяния  $l+i=t+i$  и комбинационного рассеяния  $l+l=t$ , дают, как показано в [57-62], необходимые высокие яркостные температуры излучения. В некоторых случаях вторая гармоника всплесков III типа образуется в результате слияния первой гармоники

и ленгмюровской волны  $t+l=t$ . Находит объяснение и факт “избранности” скорости  $0.3c$  для источников излучения всплесков III типа [63, 64]. В плазме солнечной короны движутся пучково-плазменные образования и с меньшими скоростями ( $v_0 < 0.3c$ ), но эффективность трансформации ленгмюровских волн этих образований в поперечные является низкой, и они практически не излучают. Вместе с этим оказывается, что пучково-плазменные образования с большими скоростями очень быстро теряют энергию за счет эффективного рассеяния на ионах плазмы в процессах  $l+i=l+i$ , в которых волны выводятся из резонанса с быстрыми электронами. “Взаимодействие” образований друг с другом напоминает взаимодействие солитонов – после взаимодействия это опять пучково-плазменные образования с изменившимися фазами [65-67]. Однако при некоторых параметрах быстрое образование поглощает медленное. Так как условия распространения пучков быстрых электронов в плазме солнечной короны – их малая плотность и большая скорость, одномерность задачи, выполнимость критерия слабой турбулентности – полностью соответствуют основным положениям газодинамической модели распространения электронов в плазме, она может быть использована для построения адекватной теории всплесков III типа.

Распространение излучения всплесков III типа на первой и второй гармониках в неоднородной плазме с учетом магнитного поля рассматривалось в работе [68]. Оказалось, что наблюдаемые характеристики всплесков III типа могут быть объяснены в модели протяженного источника в радиально неоднородной короне в рамках общепринятых моделей механизмов излучения.

С помощью кластерного анализа была сделана попытка классифицировать наблюдаемые всплески III типа [69]. Было показано, что выборка из более чем 1000 всплесков может быть подразделена на три подкласса всплесков – первая гармоника, вторая гармоника и отраженная от более глубоких слоев плазмы короны вторая гармоника.

Возможность формирования первой гармоники излучения всплеска III типа в кас-

кадной теории исследовалась в работе [70]. Рассматривался случай, когда первоначальный всплеск, генерируемый электронным пучком, сначала распадается на ленгмюровские волны на уровне, соответствующем половинной частоте излучения, а затем вновь образуется при их слиянии.

Распространение ударных волн в солнечной короне со степенной зависимостью плотности плазмы от расстояния в приближении Компанейца изучалось в работе [71]. Было показано, что имеется два режима движения. Если показатель степени  $\alpha$  в этой зависимости  $n(R) \propto R^{-\alpha}$  больше 3, то ударная волна ускоряется. В противном случае она замедляется. Это позволяет понять кинематику ударных волн, ассоциируемых со всплесками II типа.

Радиолокация Солнца является мощным активным методом изучения солнечной короны и процессов, которые в ней происходят. Успешные эксперименты Джеймса в 60-х гг. по наблюдению отражения радиосигналов на частоте 38.25 МГц дали ряд неожиданных результатов, которые оживленно обсуждались и продолжают обсуждаться. Ожидалось получить отражение от слоя плазмы с плазменной частотой, равной частоте зондирующего сигнала,  $f_{pe} = f_s$ , (этот слой находится на расстояниях от центра Солнца  $\approx (1.5 \div 1.7)R_{\odot}$ ) со значением сечения отражения  $\sigma = (1 \div 2)\pi R_{\odot}^2$  [1]. Однако в экспериментах были получены значения сечений от  $0.1\pi R_{\odot}^2$  до  $800\pi R_{\odot}^2$ . Кроме того, высоты отражений доходили до значения  $5R_{\odot}$ . В 1967 г. Гордон [72] высказал предположение, что сигнал может рассеиваться на мелкомасштабной турбулентности, которая возбуждается быстрыми частицами, ускоренными в солнечных вспышках. Эта идея получила развитие в работах [73-77], в которых было рассмотрено отражение радиолокационного сигнала при рассеянии на ленгмюровской и ионно-звуковой турбулентности, сопровождающих солнечные всплески III типа. Было показано, что рассеяние сигнала на ленгмюровских волнах в процессах  $t+l=t+l$  ( $t, l$  – электромагнитная и ленгмюровская волна, соответственно) приводит к большим сечениям отражения в том случае, если электроны, генерирующие ленгмю-

ровские волны, движутся по направлению к Земле. Это связано с тем, что рассеяние происходит в малом телесном угле в направлении “на наблюдателя”. В противном случае, т. е. когда электроны движутся в сторону от Земли, сечения отражения за счет этих процессов малы. Сдвиг по частоте отраженного сигнала  $\Delta\omega_i = 3\omega_i \frac{\omega_{pe}}{\omega_i} \frac{v_{Te} k_l \delta k_l}{\omega_{pe}^2}$  (где  $\omega_i$  – частота радиолокационного сигнала,  $k_l$  и  $\delta k_l$  – волновое число ленгмюровских волн и ширина их спектра соответственно,  $v_{Te}$  – тепловая скорость электронов) объясняет наблюдаемые в экспериментах Джеймса значения (до 80 кГц). В тех случаях, когда прохождение быстрых электронов через солнечную корону сопровождается ионно-звуковой турбулентностью, отражение происходит в результате рассеяния в процессах  $t+s=t$  ( $s$  – ионно-звуковая волна) [78, 79]. Такой процесс оказывается эффективным вплоть до высот  $5R_{\odot}$ . В этом случае отраженный сигнал представляет собой два спутника,

сдвинутых на величину  $\Delta\omega_i = \pm\omega_{pe} \sqrt{\frac{m}{M} \frac{v_{Te} k_l}{\omega_{pe}}}$  ( $m, M$  – массы электрона и иона соответственно). Сечения отражения в этом случае определяются размером областей, занятых плазмой с температурами электронов и ионов, удовлетворяющих неравенству  $T_e > T_i$ . Развитая плазменная теория отражения радиолокационного сигнала от плазменной турбулентности не только объясняет результаты, полученные в экспериментах Джеймса, но и предсказывает возможность наблюдения отраженных сигналов с частотными смещениями, сравнимыми с частотой сигнала [73, 77, 78]. Такие отражения происходят в результате рассеяния на ленгмюровской турбулентности в процессах слияния  $t+l=t$  и распада  $t=t+l$  радиолокационной волны. В первом случае будет регистрироваться сигнал на удвоенной частоте, а во втором – на половинной. При этом рассеяние происходит на высотах, где плазменная частота совпадает с частотой локации (для процесса  $t+l=t$ ) и половинной частотой локации (для процесса  $t=t+l$ ). Сечения отражения в этих случаях определяются размерами областей, занятых ленгмюров-



кой турбулентностью. В результате этих процессов возможны также отражения с меньшими частотными смещениями,  $\Delta\omega_i < \omega_i$  и  $\Delta\omega_i < \omega_i/2$  соответственно, но несколько выше в короне.

### Заключение

Проведенные исследования по изучению радиоизлучения Солнца в декаметровом диапазоне волн представляют несомненную научную ценность как для понимания процессов, происходящих на Солнце и в солнечной короне, так и тех фундаментальных физических явлений, которые приводят к излучению электромагнитных волн и их распространению в межпланетной среде. Многие результаты широко известны в мире, и в силу уникальности радиотелескопа УТР-2 являются приоритетными. Особое значение эти исследования имеют в свете введения в строй в ближайшем будущем гигантских декаметровых радиотелескопов с эффективной площадью 1 млн м<sup>2</sup>, так как они позволяют определить основные направления работы на этих телескопах и требования к ним.

### Литература

1. Басс Ф. Г., Брауде С. Я. До питання про відбиття радіолокаційних сигналів від Сонця // УФЖ. – 1957. – Т.11, №2. – С.149-164.
2. Gordon I. M. Plasma theory of radio echoes from the Sun and its implications for the problem of the solar wind // Space Science Reviews. – 1973. – Vol. 15. – P. 157-204.
3. Герасимова Н. Н. Некоторые вопросы плазменной теории формирования отраженного от Солнца радиолокационного сигнала и связь его характеристик с солнечной активностью: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: Харьков: 1975. – 123 с.
4. Базелян Л. Л., Брук Ю. М., Жук И. Н., Мень А. В., Содин Л. Г. Шарыкин Н. К. Широкополосный радиоинтерферометр с электрическим управлением диаграммой направленности // Изв. вузов. Радиофизика. – 1964. – Т. 7, № 2. – С. 215-224.
5. Базелян Л. Л., Брук Ю. М., Жук И. Н., Мень А. В., Шарыкин Н. К. Широкополосная высоконаправленная антенна декаметровых волн // Электросвязь. – 1964. – Т.5. – С. 14.
6. Брук Ю. М., Гончаров Н. Ю., Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. Т-образный радиотелескоп диапазона 10-25 МГц с электронным управлением лучом // Изв. вузов. Радиофизика. – 1967. – Т.10. – С. 608-620.
7. Брук Ю. М., Гончаров Н. Ю., Жук И. Н., Инютин Г. А., Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. Экспериментальные исследования многоэлементных антенн-решеток радиотелескопа УТР-1 // Изв. вузов. Радиофизика. – 1967. – Т.11, №1. – С. 28-44.
8. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. Сб. статей, вып.26 / Под ред. А. А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1978. – С. 3-14.
9. Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К., Брук Ю. М., Мельяновский П. А., Инютин Г. А., Гончаров Н. Н. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2 // Антенны. Сб. статей, вып.26 / Под ред. А. А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1978. – С.15-57.
10. Бабейко А. Л., Бовкун В. П., Брауде С. Я., Мень А. В., Сергиенко Ю. Ю. Интерферометр декаметрового диапазона волн УРАН-1 // Антенны. Сб. статей, вып.26 / Под ред. А. А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1978. – С. 121-134.
11. Bazelyan L. L., Sinitin V. G. Scattering of radio waves from cosmic sources in the Solar corona // Sol. Phys. – 1971. – Vol. 17. – P. 129-145.
12. Базелян Л. Л. Брауде С. Я., Мень А. В. Рассеяние декаметрового радиоизлучения Крабовидной туманности в солнечной короне // Астрон. ж. – 1970. – Т. 47. – С. 188-200.
13. Абрагин Э. П., Базелян Л. Л. Просвечивание сверхкороны декаметровым излучением ЗС144 // Астрометрия и астрофизика. – 1983. – Т. 49. – С. 41-47.
14. Абрагин Э. П., Базелян Л. Л., Гончаров Н. Ю. Радиоструктура петли в Лебедь на частоте 25 МГц // Астрон. ж. – 1977. – Т. 54. – С. 781-789.
15. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Zaitsev V. V., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Multiple radio echoes in the solar corona // Sol. Phys. – 1984. – Vol. 91. – P. 383-398.
16. Абрагин Э. П., Базелян Л. Л. Быстров М. В., Гончаров Н. Ю., Кобрин М. М., Снегирев С. Д. Квазипериодические флуктуации радиоизлучения Солнца в декаметровом диапазоне длин волн // Письма в АЖ. – 1978. – Т. 4. – С. 559-561.
17. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Goncharov N. Yu., Zaitsev V. V., Zinichev V. A., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Angular sizes of stria – burst sources in the range 24-26 MHz // Sol. Phys. – 1978. – Vol. 57. – P. 229-235.
18. Базелян Л. Л. Существуют ли локальные источники медленно меняющегося компонента на декаметровых волнах? // Письма в АЖ. – 1986. – Т.12, №4. – С. 270-274.

19. Bazelyan L. L. Search for local sources of the S-component at decametric wavelengths // *Sol. Phys.* – 1978. – Vol. 112. – P. 107-117.
20. Базелян Л. Л., Мельник В. Н. Послевсплесковое повышение яркостной температуры Солнца на декаметровых волнах // *Кинематика и физика небесных тел.* – 1990. – Т.6, №6. – С. 87-89.
21. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Tsybko Ya. G. Decametric storms of type III bursts // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement.* – 2000. – No. 3. – P.493-495.
22. Mel'nik V. N., Abranin E. P., Bazelyan L. L. Radio emission of the Sun at decameter wavelengths // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement.* – 2000. – No. 3. – P. 475-477.
23. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Lisachenko V. N., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A. Sporadic solar radio emission at decameter wavelengths // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement.* – 2005. – No. 5. – P. 61-66.
24. Mel'nik V. N., Rucker H. O., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovskiy V. V., Lisachenko V. N., Stanislavsky A. A., Boudjada M. Y., Lecacheux A. Type III bursts with fine structure // *Abstracts of the Contributions of the 1<sup>st</sup> General Assembly of the European Geosciences Union.* – Nice (France). – 25-30 April, 2004. – P. A-04317.
25. Bazelyan L. L., Goncharov N. Yu., Zaitsev V. V., Zinichev V. A., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Frequency and time splitting of decameter solar radio burst. I. Elementary events // *Sol. Phys.* – 1974. – Vol. 39. – P. 213-222.
26. Bazelyan L. L., Goncharov N. Yu., Zaitsev V. V., Zinichev V. A., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Frequency and time splitting of decameter solar radio burst. II. Chains // *Sol. Phys.* – 1974. – Vol. 39. – P. 223-231.
27. Базелян Л. Л., Зиничев В. А., Рапопорт В. О. Всплески III типа с тонкой структурой спектра в декаметровом диапазоне длин волн // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1977. – Т. 20. – С. 1399-1412.
28. Абранин Э. П., Базелян Л. Л., Гончаров Н. Ю., Зайцев В. В., Зиничев В. А., Рапопорт В. О., Цибко Я. Г. Об угловых размерах источников солнечных радиовсплесков в декаметровом диапазоне // *Астрон. ж.* – 1975. – Т.52. – С. 993-998.
29. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Goncharov N. Yu., Zaitsev V. V., Zinichev V. A., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Positions of solar storm burst sources by observations with a heliograph based on the UTR-2 antenna at 25 MHz // *Sol. Phys.* – 1980. – Vol. 66. – P. 393-409.
30. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Tsybko Ya. G. Harmonic relation of type III b-III solar radio burst in 6.25, 12.5 and 25.0 MHz octaves // *Sol. Phys.* – 1984. – Vol. 91. – P. 377-381.
31. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Goncharov N. Yu., Zinichev V. A., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Harmonic structure of type III b and III burst // *Sol. Phys.* – 1979. – Vol. 62. – P. 145-151.
32. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Tsybko Ya. G. Harmonic structure of decametric Type III emission and radio wave group delay in the solar corona // *Astron. Zh.* – 1993. – 70. – P.867.
33. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Variations of type III burst parameters during a decametric solar storm // *Sol. Phys.* – 1980. – Vol. 66. – P. 333-346.
34. Абранин Э. П., Базелян Л. Л., Цибко Я. Г. Устойчивость параметров ДКМ радиовсплесков III типа в 11-летнем цикле солнечной активности. I. Скорость частотного дрейфа. II. Длительности на кратных частотах // *Астрон. ж.* – 1990. – Т. 67. – С. 141-150.
35. Bazelyan L. L., Goncharov N. Yu., Zaitsev V. V., Zinichev V. A., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Collisionless deceleration of fast electron streams in the solar coronal plasma // *Sol. Phys.* – 1977. – Vol. 52. – P. 141-152.
36. Abranin E. P., Bazelyan L. L., Zaitsev V. V., Rapoport V. O., Tsybko Ya. G. Radio echo and sporadic radiation scattering in solar corona // *Sol. Phys.* – 1982. – Vol. 78. – P. 179-186.
37. Абранин Э. П., Базелян Л. Л., Цыбко Я. Г. Квазипериодическая структура солнечных радиовсплесков III типа с эхо компонентами // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1997. – Т. 40. – P 1073-1412.
38. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Abranin E. P., Dorovskii V. V., Lecacheux A., Stanislavsky A. A. Solar sporadic radio emission at the decametric waves // *Abstracts of International Workshop on Planetary and Solar Radio Emissions "Planetary Radio Emissions VI".* – Graz, (Austria). – 2005. – P. 69.
39. Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Станиславский А. А., Рукер Х. О., Абранин Э. П., Доровский В. В., Захаренко В. В., Лисаченко В. Н., Буджада М. Е., Лекашо А., Розолен М. Г. Обнаружение солнечных всплесков II типа в декаметровом диапазоне длин волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т.9, №3. – С.237-247.
40. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Lecacheux A., Mann G., Warmuth A., Zaitsev V. V., Boudjada M. Y., Dorovskii V. V., Zaharenko V. V., Lisachenko V. N., Rosolen C. Observations of Solar type II bursts at frequencies 10-30 MHz // *Sol. Phys.* – 2004. – Vol. 222. – P. 151-166.

41. Абрагин Э. П., Базелян Л. Л., Гончаров Н. Ю., Зайцев В. В., Зиничев В. А., Левин Б. Н., Рапопорт В. О., Цибко Я. Г. Некоторые результаты наблюдений солнечных радиовсплесков типа “дрейфующие пары” вблизи частоты 25 и 12.5 МГц // *Астрон. ж.* – 1977. – Т. 54. – С. 146-157.
42. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Dorovskii V. V., Rucker H. O., Abranin E. P., Lisachenko V. N., Lecacheux A. Solar drift pair bursts in the decameter range // *Sol. Phys.* – 2005, (принята в печать).
43. Dorovskiy, V. V., Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Abranin E. P., Lecacheux A. Observations of solar s-bursts at the decameter wavelengths // *Abstracts of International Workshop on Planetary and Solar Radio Emissions “Planetary Radio Emissions VI”*. – Graz (Austria). – 2005. – P. 68.
44. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Dorovsky, V. V. Mel'nik V. N. Absorption burst in the solar sporadic radio emission at 10-30 MHz frequencies // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement*. – 2005. – No. 5. – P. 78-81.
45. Mel'nik V. N., Kontar E. P. To gasdynamic description of a hot electron cloud in a cold plasma // *New Astronomy*. – 2000. – Vol. 5. – P. 35-42.
46. Mel'nik V. N., Lapshin V. I., Kontar E. P. Propagation of a Monoenergetic Electron Beam in the Solar Corona // *Sol. Phys.* – 1999. – Vol. 184. – P. 353-362.
47. Контарь Э. П., Мельник В. В., Лапшин В. И. Распространение моноэнергетичного пучка электронов в плазме: численное и аналитическое рассмотрение // *Физика плазмы*. – 1998. – Т. 24, №9. – С. 832-836.
48. Мельник В. Н. К вопросу о “газодинамическом” разлете потока быстрых электронов в плазме // *Физика плазмы*. – 1995. – Т. 21, №1. – С. 94-96.
49. Mel'nik V. N., Kontar E. P., Lapshin V. I. Propagation of a maxwellian electron cloud in a plasma // *Sol. Phys.* – 2000. – Vol. 196. – P. 199-212.
50. Mel'nik V. N., Kontar E. P. The spread of the hot electron cloud in the solar corona // *New Astronomy*. – 1999. – Vol. 4. – P. 41-44.
51. Kontar E. P., Mel'nik V. N., Lapshin V. I. Propagation of monoenergetic electron beams in plasma: numerical and analytical considerations // *Plasma Physics Reports*. – 1998. – Vol. 24. – P. 832-836.
52. Kontar E. P., Mel'nik V. N. Weakly turbulent electron cloud transport in a plasma with an external electric field // *Physics of Plasmas*. – 2003. – Vol. 10, No. 7. – P. 2732-2737.
53. Mel'nik V. N., Kontar E. P., Lapshin V. I. Dynamics of a fast Maxwellian electron cloud in coronal plasma // *Radio Sci.* – 2001. – Vol. 36, No. 6. – P. 1757-1766.
54. Mel'nik V. N. Propagation of electron beams in solar coronal loops // *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya. Dodatok*. – 2001. – Vol. 7, No. 2. – P. 93-95.
55. Мельник В. Н. О влиянии электрического поля на распространение пучков электронов в солнечных магнитных арках // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1997. – Т. 2, №3. – С. 298-301.
56. Mel'nik V. N., Lapshin V. I., Kontar E. P. Beam-plasma Structure as Localized Perturbation in the Problem of Electron Stream Propagation in Plasma // *УФЖ*. – 1999. – Т. 8, №48. – С. 951-957.
57. Мельник В. Н., Контарь Э. П. Распространение и излучение пучково-плазменных образований в плазме // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2003. – №4. – P. 193-196.
58. Mel'nik V. N., Kontar E. P. Plasma Radio Emission of Beam-Plasma Structures in the Solar Corona // *Sol. Phys.* – 2003. – Vol. 215, No. 2. – P. 335-341.
59. Мельник В. Н. Динаміка та випромінювання потоку швидких електронів у плазмі в сильному магнітному полі // *УФЖ*. – 1993. – Т. 38, №8. – С. 1186-1193.
60. Мельник В. Н. Радиоизлучение всплесков III типа на первой и второй гармониках в газодинамической модели // *Космическая наука и техника*. – 1992. – Т.7. – С.25-28.
61. Мельник В. Н. Нетрадиционный механизм излучения всплесков III на удвоенной плазменной частоте // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1991. – Т.7. – С. 69-71.
62. Мельник В. Н. Свойства всплесков III типа в газодинамической модели распространения пучка электронов в плазме // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1991. – Т. 7, №3. – С. 59-68.
63. Mel'nik V. N. Velocities of beam-plasma structures at their propagation in the solar corona // *Sol. Phys.* – 2003. – Vol. 212. – P. 111-119.
64. Мельник В. Н. К вопросу о скорости источников всплесков III типа // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1993. – Т. 9, №2. – С. 53-56.
65. Mel'nik V. N., Kontar E. P. Gasdynamic description of electron-beam flying-off in a plasma // *J. Plasma Phys.* – 1998. – Vol. 60. – P. 49-64.
66. Mel'nik V. N., Kontar E. P. Beam-Plasma Structures at Propagation of Electron Beams in Plasma // *Physika Scripta*. – 1998. – Vol. 58. – P. 510-517.
67. Мельник В. Н. Динаміка розльоту двох пучків електронів у плазмі // *УФЖ*. – 1998. – Т. 43, №4. – С. 446-454.
68. Stepanova N. A. Effect of the inhomogeneity of the solar corona on the directivity and intensity of

- the sources of type III bursts // *Kosmicheskaya Nauka i Tekhnika*. – 1992. – No. 7. – P. 16-24.
69. Stepanova N. A., Bazelyan L. L., Abranin E. P., Brazhenko A. I., Sapogov S. A., Tzybko Ya. G. Decameter solar type 3 bursts: Data classification with use of cluster analysis // *Sol. Phys.* – 1995. – Vol. 156, No. 1. – P. 131-143.
70. Kontorovich V. M., Pimenov S. F., Tsvyk N. A. Cascade theory of type III radio bursts (fast and slow beams in the solar corona) // *Astronomy Reports*. – 1993. – Vol. 37, No. 3. – P. 290-295.
71. Kontorovich V. M., Pimenov S. F. Investigation of Shock Wave Dynamics in an Inhomogeneous Solar Atmosphere // *Sol. Phys.* – 1997. – Vol. 172, No. 1/2. – P. 93-101.
72. Гордон И. М. Интерпретация результатов радиолокации Солнца и возможность ее экспериментальной проверки. // *Астрономический циркуляр*. – 1967. – №447. – С. 1-4.
73. Мельник В. Н. Плазменная теория отражения от Солнца радиолокационного сигнала. 1. Процессы рассеяния на анизотропной ленгмювской турбулентности // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1998. – Т.3, №1. – С. 12-21.
74. Мельник В. Н. Плазменная теория отражения от Солнца радиолокационного сигнала. 2. Анализ и интерпретация экспериментов Дж. Джеймса // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1998. – Т.3, №1. – С. 22-27.
75. Mel'nik V. N. Theory of radar echoes from the Sun // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement*. – 2000. – No. 3. – P. 495-497.
76. Mel'nik V. N., Radar scattering by anisotropic Langmuir turbulence // *Sol. Phys.* – 1999. – Vol. 184. – P. 363-367.
77. Мельник В. Н. К плазменной теории отражения от Солнца радиолокационного сигнала // *Письма в Астрономический журнал*. – 1999. – Т. 25, №5. – С. 395-400.
78. Mel'nik V. N. Plasma theory of solar radar echoes // *Radio Science*. – 2003. – Vol. 38, Issue 3. – P. 2-6.
79. Мельник В. Н. Плазменная теория отражения радиолокационного сигнала от Солнца. 3. Процессы рассеяния на ионно-звуковой турбулентности // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2001. – Т. 6, №1. – С. 45-49.
80. Khotyaintsev M. V., Mel'nik V. N., Thide B., Konovalenko O. O. Plasma theory of solar radar echoes: combination scattering on anisotropic langmuir turbulence  $t+1=t$  // *Sol. Phys.* – 2005 (в печати).

## Дослідження радіовипромінювання Сонця в Радиоастрономічному інституті НАН України

**В. М. Мельник**

У статті наводяться результати експериментальних та теоретичних досліджень радіовипромінювання Сонця в декаметровому діапазоні довжин хвиль, що проводились впродовж понад сорока років спочатку в радіоастрономічних відділах Інституту радіофізики та електроніки АН УРСР, а потім в Радиоастрономічному інституті НАН України. Найбільший в світі радіотелескоп УТР-2 (с. Гракове, РІ НАНУ) дозволяє проводити спостереження з найкращими часовою та частотною роздільними здатностями та рекордною чутливістю. Це дало можливість отримати унікальні дані у вивченні відомих явищ та відкрити нові. Результати широко репрезентовані в авторитетних світових спеціалізованих журналах та визнані науковою спільнотою.

## Solar Efforts of the Institute of Radio Astronomy NAS-Ukraine

**V. N. Melnik**

The experimental and theoretical results of the research of solar radio emission at the decameter wavelengths yielded for about forty years first at the radioastronomy departments of the Institute of Radio Physics and Electronics of the UkrSSR Acad. Sci., later at the Institute of Radio Astronomy NAS-Ukraine, are described. The world-largest radiotelescope UTR-2 (Hrakovе, IRA NASU) allows to observe the Sun with the best time and frequency resolution and record sensitivity which efforts an opportunity of finding the unique data in investigating the known phenomena and of discovering the new ones. The results are widely represented in the world-authoritative scientific journals and are recognized among scientists worldwide.