

## Модуляционные эффекты на динамических спектрах спорадического декаметрового излучения Юпитера

Г. В. Литвиненко, А. Лекашо<sup>1</sup>, Х. О. Рукер<sup>2</sup>, А. А. Коноваленко,  
Б. П. Рябов, В. В. Виноградов, В. Е. Шапошников<sup>3</sup>, У. Таубеншусс<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>*Париж-Мейдон обсерватория, Париж, CNRS UMR 8644, Франция*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований, Грац, 8042, Шмиделиттрассе, 6, Австрия*

<sup>3</sup>*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, ул. Ульянова, 46, Россия*

*Статья поступила в редакцию 10 ноября 2006 г.*

Экспериментально исследуются различные виды модуляционных эффектов, проявляющихся на динамических спектрах спорадического декаметрового излучения Юпитера. Анализируются широкополосные данные, полученные с помощью высокотехнологичных экспериментальных средств. Спектральные особенности, параметры модуляции, вероятность появления на динамическом спектре рассматриваются в зависимости от временного разрешения, достигаемого в экспериментах, и масштаба визуализации. Исследуются и уточняются характеристики как уже известных модуляционных структур, так и полученных впервые. Подробно описываются используемая новая измерительная аппаратура, методики и программа наблюдений.

### Введение

Чуть больше 50-ти лет назад Burke и Franklin [1] открыли нетепловое спорадическое излучение планеты Юпитер в декаметровом диапазоне длин волн (ДКМ). В настоящее время, несмотря на значительные успехи и неослабевающий интерес к исследованию этого явления как наземными методами, так и с помощью космических станций, пока еще не создана теория, способная полностью объяснить природу и множество уникальных особенностей, наблюдаемых на динамических спектрах ДКМ эмиссии Юпитера [2-5]. В ДКМ диапазоне излучение Юпитера является единственным планетарным излучением, принимаемым наземными обсерваториями.

По современной классификации оно состоит из двух типов широкополосных радиобурь, L (Long, временной масштаб – единицы секунд,  $1 \div 100$  с) и S (Short, короткие импульсы с длительностью на одной частоте  $1 \div 100$  мс). Предполагается, что временные масштабы L-излучения обязаны своим происхождением рассеянию излучения на неоднородностях межпланетной плазмы и земной ионосферы. Характерные масштабы S-всплесков относятся скорее к свойствам самого источника радиоизлучения. В силу своих специфических особенностей и сложной структуры динамических спектров S-всплески представляют собой наиболее экзотическую компоненту эмиссии [6-8]. S-всплески наблюдаются от так называемых

Ио-связанных источников, т. е. их появление строго контролируется орбитальным положением ближайшего крупного спутника Юпитера Ио относительно высшего геоцентрического соединения. Ио-связанное излучение группируется в четырех определенных долготных интервалах (источники А, В, С, и D). S-излучение Юпитера является самым мощным радиоизлучением в Солнечной системе, его характерные особенности могут служить прототипом для поиска планетарных всплесков и, следовательно, “экзопланет” [9]. Поэтому проблема дальнейшего серьезного изучения свойств и механизмов генерации ДКМ спорадического излучения Юпитера остается одной из актуальных радиоастрономических задач.

Следует отметить, что, несмотря на достаточно обширные исследования ДКМ эмиссии, детальное описание и анализ модуляционных событий на разных частотно-временных масштабах представлены недостаточно полно. Это объясняется, во-первых, несовершенной техникой экспериментов (низкие чувствительность, динамический диапазон и разрешающая способность аппаратуры) и, во-вторых, использованием математических методов обработки данных, не вполне эффективных, например, для обнаружения мелкомасштабных нестационарных спорадических структур. Следовательно, необходимы как дальнейшая более детальная интерпретация полученных результатов, так и развитие теории. Одновременно не менее важно продолжение экспериментальных исследований на основе более совершенных и эффективных радиоастрономических антенн, средств регистрации, методов наблюдений и обработки данных. Есть основания считать, что обнаружение более слабых явлений или не наблюдавшихся ранее слабоконтрастных тонких частотно-временных структур облегчит понимание физики радиоизлучения Юпитера в целом.

Наблюдения в широком интервале частот, охватывающем весь ДКМ диапазон ( $1 \div 39$  МГц), с временным разрешением от нескольких микросекунд до сотен миллисекунд, показали, что ДКМ излучение

обладает сложной частотно-временной структурой. В зависимости от разрешения на динамических спектрах выделяются различные виды модуляции, как временной, так и частотной. Результаты исследований некоторых из этих явлений приведены в статьях [10-21]. Например, фарадеевское вращение плоскости поляризации ДКМ эмиссии Юпитера было детально изучено в работах [18, 21]. Riihimaа [11] впервые описал эффект “модуляционных дорожек”, групп чередующихся полос высокой и низкой интенсивности, дрейфующих на частотно-временной плоскости. Им было показано, что на спектрах “модуляционные дорожки” могут иметь или положительный, или отрицательный дрейф по частоте, либо представлять собой суперпозицию полос одновременно и с тем, и с другим знаком дрейфа. Для объяснения природы этого явления вначале Riihimaа, а затем Imai [22] предложили модель “интерференционного экрана”, в основе которой лежит дифракция декаметрового излучения на неоднородностях плазменного тора Ио. Genova и др. [16] выделили новый класс модуляции – “высокочастотные полосы”, отличительной особенностью которых является их расположение в высокочастотной области динамического спектра. Кроме того, на основании анализа большого количества экспериментальных данных авторами были предложены критерии выделения модуляционных событий, связанных с осцилляциями земной ионосферы и межпланетной среды. В статьях Рябова и др. [6, 23] на основе анализа значительного количества высокочувствительных динамических спектров изучалась эволюция тонкой структуры S-всплесков одновременно с мультимасштабными спектрами радиобурь зависящего от Ио излучения. Был отмечен такой интересный наблюдательный факт, связанный с процессом формирования тонкой структуры ДКМ излучения, как повторение самоподобных изображений всплесков с различным масштабом на частотно-временной плоскости. В работах [24, 25], используя оригинальные процедуры улучшения временного разре-

ния (до 1 мкс), авторы впервые показали, что простые S-всплески Юпитера имеют внутреннюю микроструктуру, которая также может представлять собой один из видов модуляции ДКМ излучения.

Целью настоящей работы являются новые исследования и предварительный анализ большого числа динамических спектров декаметровой эмиссии Юпитера. В экспериментах использовалась разработанная в последние годы новая высокоэффективная приемная аппаратура (цифровой спектрополяриметр, DSP [26], и приемник прямой регистрации сигналов, WFR [27]). Наблюдения осуществлялись на самом большом в мире телескопе декаметрового диапазона УТР-2 (Харьков, Украина) и на декаметровой антенне Нанси, NDA, (Нанси, Франция) [28]. Применение наиболее совершенных антенн и приемно-регистрирующих средств обеспечило наилучшее на настоящий момент сочетание чувствительности, полосы анализа, динамического диапазона, частотного и временного разрешений. Особое внимание уделено поиску и исследованию разнообразных эффектов модуляции, проявляющихся на частотно-временных спектрах как в зависимости от временного разрешения регистрации, так и от временного масштаба визуализации сигналов. В работе демонстрируются уже известные и обнаруженные впервые модуляционные структуры. Рассмотрены некоторые теоретические аспекты, касающиеся механизмов модуляции ДКМ эмиссии Юпитера, модели образования “модуляционных дорожек” и поляризационные свойства излучения.

## 1. Аппаратура и методы наблюдений

### 1.1. Радиотелескопы

За 50 лет наземных исследований спорадического декаметрового радиоизлучения Юпитера большое количество основополагающих данных было получено с помощью сравнительно небольших антенн с эффективной площадью всего несколько сотен квадратных метров (малоразмерные решет-

ки, яги-антенны, логопериодические антенны и т. д.). Примером таких плодотворных наблюдений могут служить исследования Riihimaа в университете Оулу, Финляндия, проведенные в диапазоне 21 ÷ 23 МГц с помощью 4-элементной антенны с чувствительностью лишь  $10^5$  Ян [11-14]. Такая возможность объясняется тем, что наиболее характерные виды ДКМ излучения Юпитера имеют весьма большую плотность потока (до  $10^7$  ÷  $10^8$  Ян).

Радиотелескоп УТР-2 [29] на настоящий момент – самый крупный инструмент ДКМ диапазона волн. Его отличительными особенностями являются большие линейные размеры и эффективная площадь, высокая направленность и низкий уровень боковых лепестков, широкий диапазон частот, многолучевость, электронное управление лучом в широком секторе по азимуту и углу места, большие динамический диапазон и линейность тракта, помехоустойчивость, гибко изменяющаяся конфигурация, развитая система контроля. Такие параметры важны с точки зрения исследования Юпитера на новом качественном и количественном уровнях.

Декаметровая решетка Нанси (NDA), несмотря на сравнительно небольшие размеры, хорошо адаптирована для исследований Юпитера, в первую очередь, благодаря широкому диапазону частот, электронному сканированию, возможностям измерений степени и направления поляризации [30].

Антенна УРАН-2 [31] в настоящих исследованиях Юпитера использовалась эпизодически. Однако ее активное применение в ближайшем будущем весьма перспективно: это вторая в мире по размерам (после УТР-2) антенна и к тому же с поляриметрическими возможностями.

В ряде исследований упомянутые антенны использовались одновременно. Возможна также организация режима радиоинтерферометрии с максимальной базой до 3000 км.

Радиотелескоп NDA создавался в конце 70-х годов именно для юпитерианских исследований. Антенна УТР-2 активно использовалась для наблюдений Юпитера с начала 80-х годов. Рябовым и др. [7] было получено

большое количество высококачественных спектров на антенне Запад-Восток УТР-2, а после внедрения новой широкополосной помехоустойчиво системы антенного усиления [32] – на вдвое большей по размерам антенне Север-Юг УТР-2, в том числе с применением акустооптического анализатора спектра [23].

### 1.2. Новая регистрирующая аппаратура

Потенциальные возможности крупных радиоастрономических антенн не могут быть реализованы без адекватной приемно-регистрирующей аппаратуры. Прогресс электронной, цифровой и компьютерной техники, особенно в последние 5–10 лет, позволил создать эффективные цифровые регистрирующие устройства нового поколения. Требования к аппаратуре, необходимые для получения качественно новой информации о спорадическом радиоизлучении Юпитера, очевидны. Так, полоса одновременного анализа должна быть соизмерима с диапазоном излучения, принимаемым на Земле ( $\sim 10 \div 40$  МГц), т. е. более 10 МГц. Временное и частотное разрешения должны составлять  $\sim 1$  мс (и менее) и порядка единиц кГц соответственно (число эквивалентных частотных каналов  $> 1000$ ). Динамический диапазон (отношение максимальной интенсивности сигнала к минимальной) должен быть более  $10^5$ . Требования, перечисленные выше, диктуются, во-первых, варьируемыми в широких пределах по интенсивности, частоте и времени, параметрами радиоизлучения Юпитера, во-вторых, условиями ослабления влияния и идентификации узкополосных, широкополосных и интермодуляционных сигналов помех, свойственных декаметровому диапазону.

Очевидно, что современные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и спектропроцессоры с количеством разрядов  $12 \div 16$  бит и частотой квантования несколько десятков мегагерц, компьютеры с тактовой частотой более 1 ГГц, объемом оперативной памяти несколько гигабайт, а также с внешней памятью емкостью в сотни гигабайт, позволяют реализовать перечисленные требования к эффективной регистрации юпитерианских сигналов.

Впервые применительно к ДКМ радиоастрономии эти идеи были осуществлены во Франции и Австрии при создании цифровых спектральных анализаторов [26, 33], которые на протяжении последних  $5 \div 10$  лет активно используются на существующих ДКМ телескопах [34].

#### 1.2.1. Цифровые спектральные процессоры (DSP)

Аналоговая часть спектрометра DSP обеспечивает усиление, преобразование и фильтрацию сигнала, поступающего с выхода радиотелескопа. В результате имеем: перестраиваемая в диапазоне входных частот  $f_0 = 5 \div 50$  МГц полоса  $B = 12.5$  МГц; сквозное усиление  $K \sim 40$  дБ; шумовая температура на входе  $T_{ш} \sim 500$  К (существенно меньше антенной температуры галактического фона).

АЦП имеет  $b = 12$  разрядов, что дает динамический диапазон  $D_{дб} \approx 6 \cdot b \approx 72$  дБ ( $\sim 10^7$ ), и работает на тактовой частоте  $F_s = 2 \cdot B = 25$  МГц. Данные АЦП подаются через плату сопряжения на DSP-карту. Далее регистрация и вычисления проводятся в цифровом виде в реальном времени и включают в себя следующие основные шаги: секционирование последовательностей выборок сигналов, преобразование Фурье взвешенных последовательностей данных и усреднение. Таким образом, реализуется алгоритм:

– взвешивание вектора данных  $s_k(t)$  (точнее, после АЦП  $s_k(t) = s_k(nT_s)$ , где  $n$  – номер отсчета,  $T_s = 1/F_s$  – период дискретизации,  $F_s$  – частота квантования в АЦП):

$y(t) = w(t)s_k(t)$ , где  $w(t)$  – весовая функция;

– вычисление быстрого преобразования Фурье (FFT) каждого вектора:

$$W(f) * S_k(f) = FFT\{y(t)\},$$

где  $S_k(f)$  означает фурье-преобразование  $s_k(t)$ ,  $W(f)$  – фурье-преобразование  $w(t)$ , знак (\*) – операция свертки;

– вычисление периодограммы:

$$P_k(f) = [W(f) * S_k(f)] \cdot [W(f) * S_k(f)]^*,$$

где  $[W(f) * S_k(f)]^*$  – комплексно-сопряженное значение величины  $[W(f) * S_k(f)]$ ;  
– усреднение по  $K$  индивидуальных периодограмм:

$$P(f) = \langle P_k(f) \rangle.$$

Реально каждое устройство состоит из двух идентичных каналов. Поэтому возможно определение двух независимых автоспектров (периодограмм  $P_1(f)$  и  $P_2(f)$ ), например, для работы в ON - OFF режиме (ON – один луч направлен на источник, OFF – второй луч в это же время отведен от источника). Кроме того, возможна организация мультипликативного режима, например, для обеспечения принципа функционирования корреляционного телескопа (Т-образная антенна УТР-2 построена по такому принципу) или для поляризационных измерений (NDA, УРАН-2), когда регистрируются две составляющие напряженности поля и, следовательно, определяются параметры Стокса. В этом случае устройство вычисляет кросс-спектр (комплексный)

$$P_{\text{cross}}(f) = \langle [W(f) * S_{1k}(f)] \cdot [W(f) * S_{2k}(f)]^* \rangle.$$

Значение  $K$  не может быть существенно увеличено, поскольку требуется определенное временное разрешение  $\Delta\tau$ . Следовательно,  $P(f)$  может быть вычислено, если использовать только последовательность выборок на интервале  $\Delta\tau$ . С другой стороны, для получения  $N$  частотных каналов необходимо  $2N$  выборок, из которых могут быть рассчитаны индивидуальные периодограммы  $P_k(f)$ . Следовательно, число индивидуальных периодограмм  $K$  может быть определено из соотношения

$$K = F_s \Delta\tau / 2N.$$

В этом случае серия выборок на интервале  $\Delta\tau$  секционирована на  $K$  неперекрывающихся векторов данных  $s_k(t)$  длиной  $2N$  выборок. Для повышения надежности на практике применено 50 %-е перекрытие секционированных последовательностей выборок.

Цифровая часть оборудования строится на основе стандартной платы сопряжения (VME) для передачи данных между основным (Sun Station) и DSP-процессорами. Большой объем вычислений требует применения мультипроцессорной архитектуры. Использовано 20 процессоров ADSP-21060 (Analog Devices), каждый из которых дает  $10^8$  операций в секунду. Это обеспечивает работу в реальном времени в полосе  $B = 12.5$  МГц с  $N = 1024$  частотными каналами и 50 %-ым перекрытием последовательностей. Частотное разрешение фиксировано, составляет  $\Delta f = 12.5$  кГц, временное варьируется,  $\Delta\tau = 1$  мс  $\div$  1 мин.

### 1.2.2. Приемное устройство прямой регистрации (WFR)

Несмотря на высокую эффективность описанного выше устройства, имеются задачи, в том числе при изучении Юпитера, требующие несколько иного подхода. Так, временное разрешение DSP лимитируется величиной 1 мс. В вычисляемых энергетических авто-спектрах или кросс-спектрах теряется информация о фазе сигнала, которая в ряде случаев может представлять интерес. По той же причине (в связи с несохранением исходной временной реализации) невозможно применить специальные методы обработки данных.

Современный уровень техники позволяет продвинуться в решении указанных проблем. Используя быстродействующие АЦП и устройства ввода данных, а также достаточно большие массивы памяти, можно непосредственно зарегистрировать исходную реализацию определенной продолжительности. Подобное устройство создано на основе аналоговой части DSP, АЦП с тактовой частотой 50 МГц и платы сопряжения PSI. При большом потоке данных (100 Мб/с) и при объеме оперативной памяти компьютера 650 Мб, можно зарегистрировать ре-

лизацию длиной 6.5 с. После перезаписи данных регистрация может быть продолжена. Для обработки сигналов, в том числе для получения сверхвысокого временного разрешения ( $\ll 1$  мс), применяются различные методы (см. раздел 2). Быстрое заполнение памяти – естественное ограничение в применении данного подхода. Для сравнения, максимальный поток выходных данных DSP составляет (для наивысшего временного разрешения 1 мс) всего лишь несколько мегабайт в секунду. Однако не вызывает сомнений, что в ближайшем будущем технические ограничения, свойственные WFR, будут практически сведены к минимуму.

Перечисленные средства были установлены и применены на радиотелескопах NDA, УТР-2 и УРАН-2 в период с 1996 по 2002 гг., что позволило провести более эффективные радиоастрономические исследования в ДКМ диапазоне волн [34, 35], в том числе изучение радиоэмиссии Юпитера.

### 1.3. Чувствительность и информативность наблюдений

Представляет интерес сравнение чувствительности и информативности предыдущих, настоящих и возможных будущих экспериментальных исследований радиолучения Юпитера.

Флуктуационная чувствительность радиоастрономических экспериментов (минимально обнаружимая плотность потока) определяется хорошо известным соотношением [36]

$$\Delta S_{\min} = \frac{k_b T_{\text{sys}}}{A_{\text{eff}} \sqrt{\Delta f \Delta \tau}}, \quad (1)$$

где  $k_b$  – постоянная Больцмана,  $T_{\text{sys}}$  – температура шумов системы,  $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь антенны,  $\Delta f$  – частотное разрешение.

На ДКМ волнах  $T_{\text{sys}}$  определяется яркостной температурой галактического фона  $T_{bg}$ , которая, естественно, уменьшена быть не может. Для реализации минимального значения  $T_{\text{sys}} = T_{bg}$  необходимо обеспечить условие  $T_{bg} \eta \gg T_N$ , где  $\eta$  – к. п. д. части антенны от входа диполей до первого звена

приемно-усилительной системы (система антенного усиления),  $T_N$  – шумовая температура последней. Для УТР-2 ( $\eta = 0.3 \div 0.05$ ,  $T_{bg} = 4 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^4$  К в диапазоне  $10 \div 30$  МГц) это условие выполняется. В принципе, если иметь в виду, что перепады в яркостной температуре фона на ДКМ волнах могут достигать  $6 \div 8$  дБ, можно заключить, что в зависимости от положения Юпитера относительно галактической плоскости чувствительность по плотности потока (1) может изменяться в несколько раз, особенно при использовании высоконаправленной антенны. Однако в любом случае применение антенны с большой эффективной площадью важно для уменьшения  $\Delta S_{\min}$ . Это требование усиливается, если учесть необходимость повышения частотного и временного разрешений, т. е. уменьшения  $\Delta f$  и  $\Delta \tau$  в (1). Так, при потенциально достижимых разрешениях на уровнях 1 кГц и 1 мкс (которые были реализованы в исследованиях [25] и ранее в работах Carr и др. [24]) даже при гигантской площади УТР-2 ( $\sim 10^5$  м<sup>2</sup>) для  $T_{\text{sys}} = T_{bg} \sim 25000$  К на частотах  $20 \div 30$  МГц имеем  $\Delta S_{\min} = 10^4 \div 10^5$  Ян. Отсюда следует, что изучение сверхтонкой структуры S-всплесков реально для событий, близких по интенсивности к максимальным, и практически невозможно при площадях антенны  $\leq 10^3$  м<sup>2</sup>. В то же время более легко реализуемые в настоящих экспериментах частотное и временное разрешения 12 кГц и 1 мс дают для УТР-2 чувствительность  $10^2 \div 10^3$  Ян, что является рекордной величиной для наземной ДКМ радиоастрономии при указанных разрешениях.

Для получения качественных динамических спектров и неперестраиваемой регистрации событий любой интенсивности, от максимально возможной ( $\sim 10^8$  Ян) до минимально обнаружимой (для УТР-2 это  $\sim 10^2$  Ян), необходим динамический диапазон  $\geq 10^6$ , что и реализуется в применяемых DSP и WFR ( $70$  дБ =  $10^7$ ).

Таким образом, чувствительность и информативность измерений зависят от многих факторов, определяемых параметрами антенны и регистрирующей аппаратуры и степенью их адекватности характеристикам

излучения Юпитера. Суммируя сказанное в разделах 1.1 – 1.3, можно ввести приближенную оценку степени информативности экспериментов, в данном случае для изучения ДКМ эмиссии Юпитера:

$$I = \frac{A_{\text{eff}}^* B t N_p D_{\text{dB}} F}{\Delta f \Delta \tau},$$

где  $A_{\text{eff}}^*$  – максимальная эффективная площадь антенны, км<sup>2</sup> ( $A_{\text{eff}}^* = 0.1$  для антенны Север-Юг радиотелескопа УТР-2);  $B$  – мгновенная полоса анализа, МГц;  $t$  – максимальное время слежения за объектом в сутки, ч;  $N_p$  – количество измеряемых поляризаций (NDA – 2, УТР-2 – 1);  $D_{\text{dB}} = \lg D$  – динамический диапазон регистрирующей аппаратуры;  $\Delta f$  – частотное разрешение, кГц,  $\Delta \tau$  – временное разрешение, мс;  $F$  – фактор заполнения полосы анализа (если число эквивалентных каналов  $N = B/\Delta f$ , то  $F = 1$ ).

Следует отметить, что параметры  $A_{\text{eff}}^*$  и  $N_p$  определяются только антенной системой (динамический диапазон антенного тракта должен быть заметно выше, чем у регистрирующей аппаратуры),  $\Delta f$ ,  $\Delta \tau$ ,  $F$  – выходной регистрирующей аппаратурой, а значения  $B$ ,  $t$ ,  $D_{\text{dB}}$  являются функциями и антенной системы и регистрирующей аппаратуры. Время слежения за объектом  $t$  должно обеспечивать непрерывность наблюдений, т. е. регистрацию и обработку в реальном времени без остановок и пропусков на обработку или передачу информации с одних устройств памяти на другие.

В случае применения радиотелескопа УТР-2 и описанной выше аппаратуры DSP ( $A_{\text{eff}}^* = 0.1$  км<sup>2</sup>;  $B = 12.5$  МГц;  $t = 8$  ч;  $N_p = 1$ ;  $D_{\text{dB}} = 7$ ;  $F = 1$ ;  $\Delta f = 12$  кГц;  $\Delta \tau = 1$  мс) имеем  $I = 5.83$ , что в несколько раз лучше, чем в предшествующих экспериментах.

Представленные в настоящей работе исследования имеют на данный момент наивысшую степень информативности в связи с лучшим сочетанием эффективной площади (чувствительности), полосы анализа, динамического диапазона, частотного и временного разрешений используемых экспериментальных средств.

#### 1.4. Программа наблюдений

Основная часть экспериментальных исследований выполнялась в период 1999 – 2002 гг. с помощью радиотелескопов УТР-2 и NDA и двух комплектов DSP, установленных на обеих антеннах. Короткие сеансы наблюдений были проведены с применением WFR + УТР-2, WFR + NDA и DSP + УРАН-2. Наблюдения проводились, как правило, согласно диаграмме появления Ио-контролируемого S-излучения. В ряде случаев эксперименты на УТР-2 и NDA организовывались одновременно с точной временной синхронизацией (< 5 мс). Продолжительность суммарного сеанса составляла несколько часов в ночное и дневное время. Общее количество сеансов наблюдений около 30. Из соображений оптимального заполнения памяти DSP и внешних накопителей информации временное разрешение варьировалось в пределах от 1 до 100 мс. Выходная информация (результаты FFT для 1024 точек спектра, каждый из которых соответствует заданному временному разрешению) хранится на лазерных дисках в Харькове, Мейдоне и Граце. Общий объем данных 300 Гб. В информационном файле записаны значения спектров в виде положительных действительных чисел (с плавающей точкой), а в заголовке к нему – вся необходимая для обработки служебная информация. Отдельно формируется файл для калибровки данных (пересчет к абсолютным значениям интенсивностей), содержащий параметры антенны и уровни калибровочных сигналов. Программа обработки сигналов написана в оболочке IDL (Ideal Dialog Language). Данные двумерного массива (частота-время) могут выводиться в виде яркостного динамического спектра. До калибровки данные по интенсивности представляются в относительных единицах.

## 2. Методы математической обработки сигналов

Для теоретического исследования, обработки и интерпретации свойств сигналов применяются различные методы. Традиционно используется эффективный математический

подход – спектральный анализ, основанный на преобразовании Фурье, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала. Этот подход реализован аппаратно-программными методами в DSP (см. раздел 1.2.1). Преобразование Фурье связывает временной или пространственный сигнал с его представлением в частотной области, т. е. раскладывает его на частотные компоненты и устанавливает относительную интенсивность каждой такой компоненты. Недостаток стандартного фурье-анализа для исследования нестационарных (спорадических) процессов, какими, например, являются ДКМ S-всплески, заключается в невозможности осуществления временной локализации сингулярностей сигнала, т. е. невозможности получить полную информацию о тонких особенностях спектра. Это объясняется тем, что в фурье-преобразовании анализирующая функция покрывает всю временную ось, и в силу соотношения неопределенности нельзя достичь одновременно хорошей локализации сигнала как в частотной, так и во временной области. Эта проблема может быть частично решена при помощи введения в преобразование так называемого окна – движущейся по временной оси функции, имеющей компактный носитель. Использование оконной функции  $w(t)$  позволяет представить результат анализа (фурье-образ) одномерного сигнала  $s(t)$  в зависимости от двух переменных, частоты сигнала  $\omega$  и времени положения окна  $\tau$ :

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau) s(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Следует отметить, что как при сдвиге окна, так и при изменении частоты ширина анализирующего частотно-временного прямоугольника остается неизменной, поскольку операция преобразования Фурье осуществляется при постоянной ширине носителя оконной функции. Однако существуют такие сигналы, спектральное содержание которых изменяется столь быстро, что трудно

подобрать подходящую короткую ширину временного окна так, чтобы исследуемый сигнал на этом отрезке времени был более или менее стационарным. Кроме того, уменьшение длительности оконной функции ухудшает разрешение по частоте. Следовательно, для анализа нестационарных спорадических сигналов необходимо использовать такое совместное частотно-временное распределение, которое описывает интенсивность исследуемого сигнала одновременно во временной и частотной областях. Естественно, что для такого анализа необходимо использовать исходную реализацию сигнала, что и обеспечивает WFR (см. раздел 1.2.2).

В последнее время общепризнанным становится факт, что описанным выше требованиям удовлетворяют вейвлет-функции, которые благодаря своей частотно-временной локализации способны аппроксимировать тонкую, нелинейную, нерегулярную структуру сигналов [37]. Локализация вейвлет-функций во времени подразумевает концентрацию их энергии внутри ограниченного интервала, а также выполнение одного из законов их убывания. Частотная локализация предполагает компактность носителей фурье-образов вейвлетных функций, т. е. локализацию энергии внутри определенного частотного интервала. Для того чтобы определить существующие тонкие нестационарные особенности сигналов, необходимо иметь набор вейвлет-функций, образующих базис функционального Гильбертова пространства  $L_2(R)$ , полученных путем неоднократных масштабных преобразований и трансляций одной функции материнского вейвлета  $\Psi(t)$  (солитоноподобная функция). Транслирование материнской функции, обеспечивающее временную локализацию, представляет собой сдвиг по временной оси с параметром сдвига  $t$ . Масштабирование (частотная локализация) – сжатие и растяжение с масштабным коэффициентом  $a$ , являющимся аналогом обратной частоты в преобразовании Фурье. Каждая из функций базиса характеризует как пространственную (временную) частоту, так и ее локализацию в физическом про-



странстве. Частота и координата в этом случае рассматриваются как независимые переменные. Вейвлетное преобразование одномерного сигнала  $s(t)$  состоит в его разложении по базису  $\psi_{a,t}(t') = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t'-t}{a}\right)$ .

Существуют два основных типа вейвлетного преобразования: непрерывное и дискретное. При непрерывном вейвлет-преобразовании масштабный коэффициент  $a \in \mathbb{R}_+$  и параметр сдвига  $t \in \mathbb{R}$  изменяются непрерывно в пространстве  $L_2(\mathbb{R})$ . При дискретном вейвлет-преобразовании оба параметра принимают только дискретные значения.

В работе [38] было показано, что для анализа спорадических сигналов более эффективно применение непрерывного вейвлетного преобразования. Это связано с его избыточностью, которая является результатом непрерывного изменения масштабного коэффициента  $a$  и параметра сдвига  $t$ , и позволяет более полно и четко представить и рассмотреть существующую в данных информацию. Непрерывное вейвлетное преобразование записывается как

$$W(a, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t') \psi_{a,t}(t') dt'$$

Вейвлетная трансформация одномерного сигнала дает его простое двумерное частотно-временное описание  $W(a, t)$ , определенное на полуплоскости  $]R_+, R[$ . Выбор функции материнского вейвлета  $\Psi(t)$  осуществляется для каждой конкретной задачи в зависимости от известных или предполагаемых свойств анализируемого процесса.

Следует отметить, что для изучения нестационарных процессов применяются методы Вигнера–Виля, Цзюя–Уильямса [39] и т. д., в основе которых лежит применение различных видов частотно-временных распределений. Например, в преобразовании Вигнера–Виля представление энергии  $P(\omega, t)$  исследуемого сигнала  $s(t)$  на частотно-временной плоскости связано с определением “мгновенной частоты”  $\omega$ ;

$$\omega_i = \frac{d\tilde{\Psi}(t)}{dt} = \frac{\dot{s}(t)s_g(t) - s(t)\dot{s}_g(t)}{s^2(t) + s_g^2(t)},$$

Здесь  $\tilde{\Psi}(t)$  – мгновенная фаза аналитического сигнала  $Z(t) = U(t)e^{j\tilde{\Psi}(t)} = s(t) + js_g(t)$ , где  $U^2(t) = s^2(t) + s_g^2(t)$ ,  $s_g(t)$  – преобразование Гильберта от  $s(t)$ . В этом случае распределение  $P(\omega, t)$  выражается следующим образом:

$$P(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} Z^*(t - \tau/2) e^{j\omega\tau} Z(t + \tau/2) d\tau.$$

Преобразование Вигнера–Виля является нелокальным, т. е. спектральный образ, полученный в момент времени  $t$ , зависит от свойств сигнала в другие моменты времени. В результате преобразование Вигнера–Виля может оказаться “зашумленным” из-за наличия шума в какой-то сравнительно небольшой отрезок времени. Другим недостатком метода является его нелинейность, проявляющаяся в появлении комбинационных частот.

И для вейвлетного, и для Вигнера–Виля преобразований характерна неоднозначность толкования полученных частотно-временных спектров.

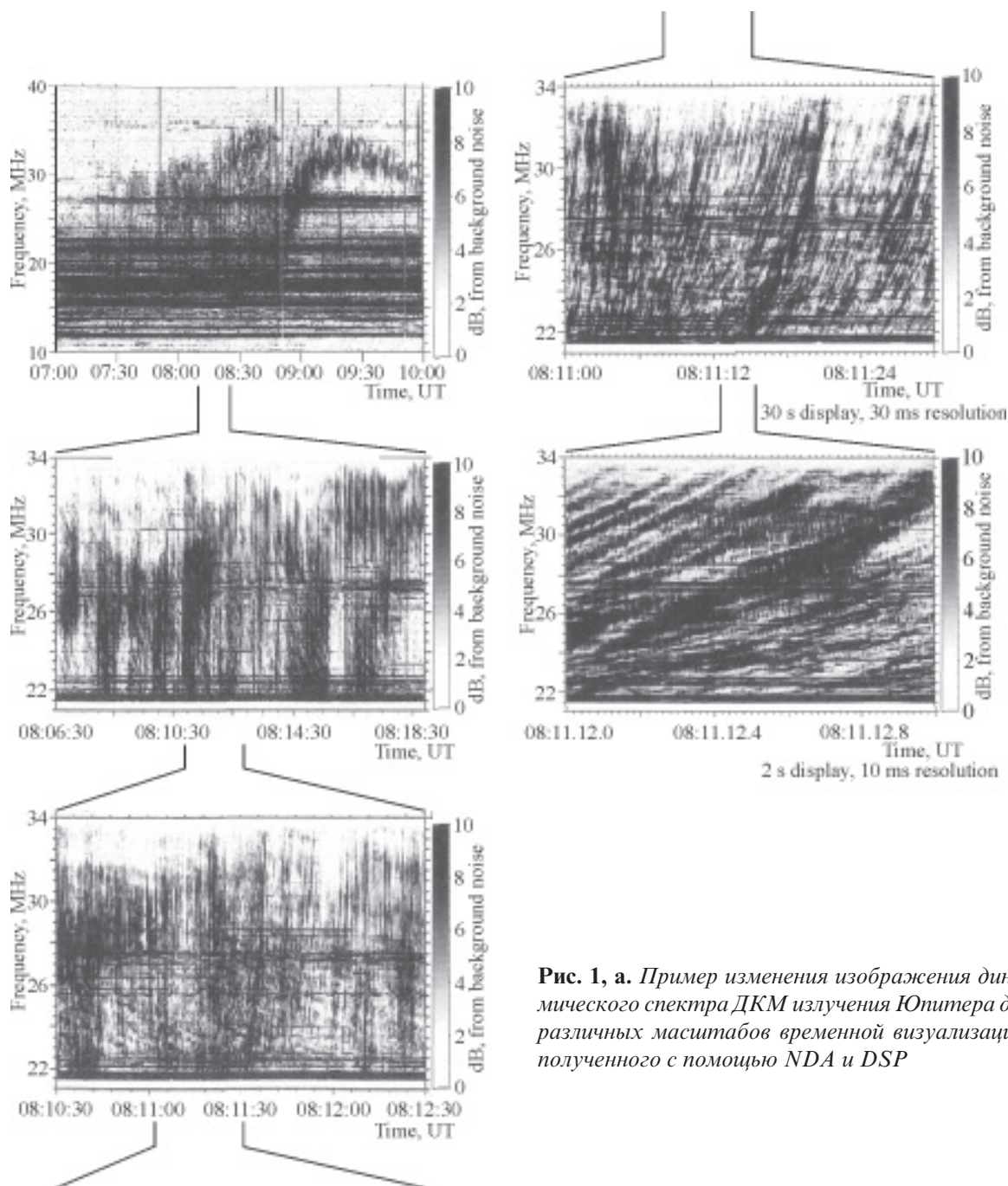
В настоящей работе для построения спектров и исследования модуляционных структур различных видов и временных масштабов в спорадическом ДКМ излучении Юпитера использовался как классический фурье-анализ (DSP, WFR), так и метод вейвлетного преобразования сигналов (WFR).

### 3. Модуляционные эффекты в ДКМ излучении Юпитера

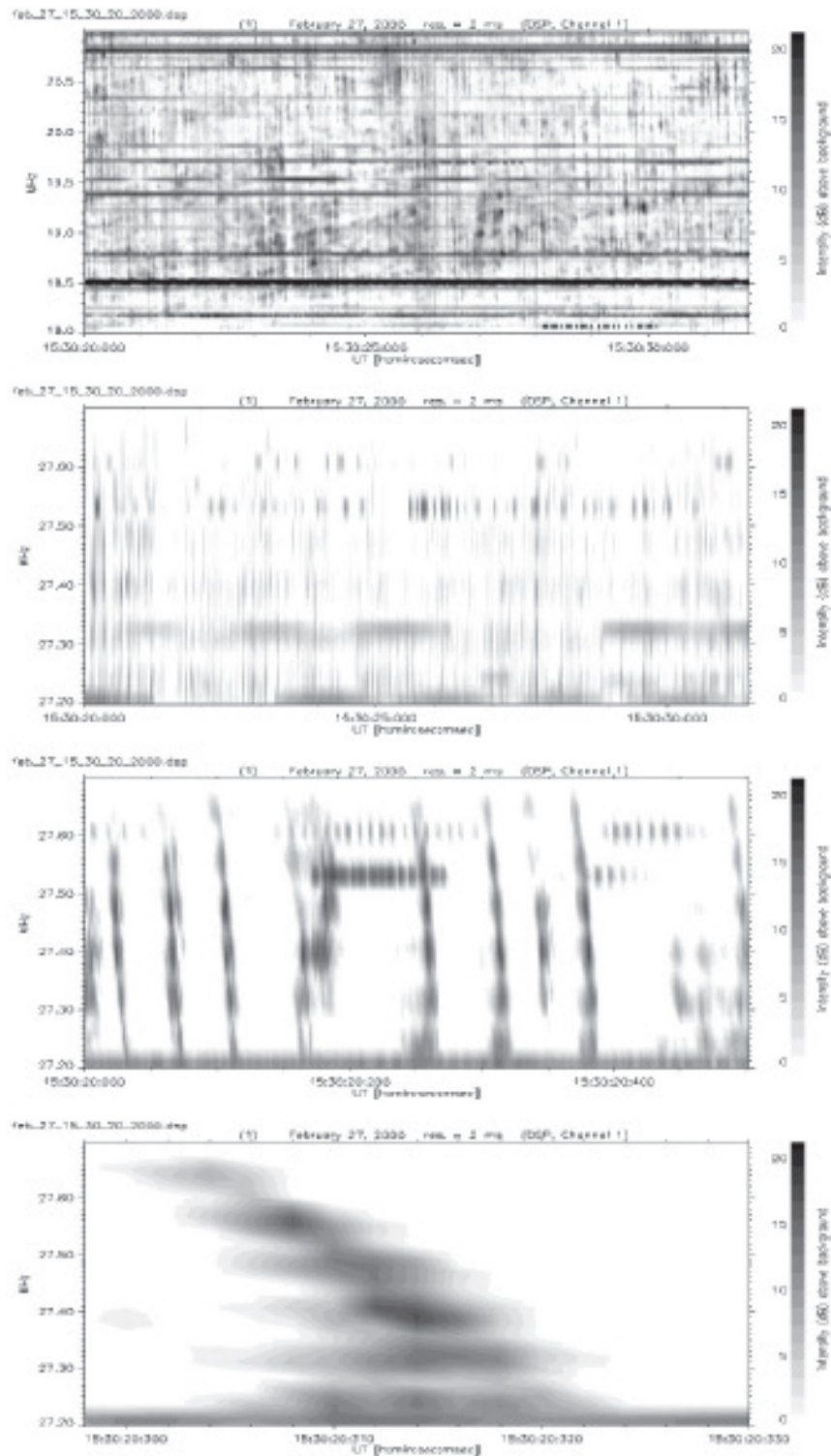
Анализ большого количества динамических спектров позволяет с определенной долей уверенности утверждать, что практически все наблюдаемое спорадическое ДКМ излучение Юпитера тем или иным образом модулировано. В каждом конкрет-

ном случае природа модуляции может быть различной. Излучение может подвергаться воздействию каких-либо модуляционных процессов как в самом источнике генерации, так и по пути распространения к наблюдателю (в магнитосфере Юпитера, межпланетном пространстве, ионосфере Земли). В зависимости от временного масштаба представления данных на динамических

спектрах проявляются различные виды модуляционных эффектов. Это естественным образом затрудняет анализ, и, особенно, интерпретацию данных. На рис. 1, а показаны примеры динамических спектров одного и того же события, но различных временных масштабов визуализации, полученных с помощью NDA и DSP. На рис. 1, б продемонстрирован еще один характерный



**Рис. 1, а.** Пример изменения изображения динамического спектра ДКМ излучения Юпитера для различных масштабов временной визуализации, полученного с помощью NDA и DSP



**Рис. 1, б.** Различные виды динамического спектра излучения Юпитера при изменении временной и частотной визуализации, полученного с помощью УТП-2 и DSP

пример того, как при изменении временного и частотного интервалов меняется изображение спектра на частотно-временной

плоскости. Эти картинки получены с помощью УТП-2 и DSP. Следует особо отметить, что столь большое многообразие очевидных

различных временных и частотных модуляционных эффектов и свойств ранее в литературе представлено не было.

В настоящем разделе рассмотрены образцы динамических спектров декаметровый эмиссии Юпитера, полученные на DSP и WFR со сверхвысоким разрешением. Особое внимание уделялось обнаружению и детальному исследованию уже известных и пока неизученных модуляционных особенностей излучения.

### 3.1. Фарадеевские полосы

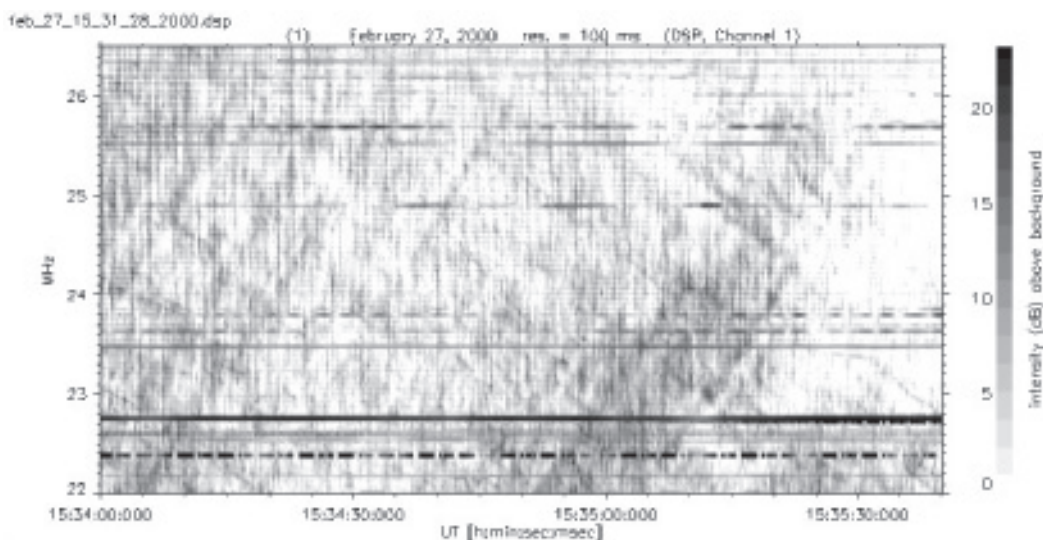
Среди классических примеров медленной модуляции, обусловленной, по мнению многих авторов, эффектами распространения, выделяется возникающая на динамических спектрах структура горизонтальных (вдоль оси времени) чередующихся полос слабой и сильной интенсивности (отчетливо видна на всех приведенных рисунках). При уменьшении частоты плотность полос на спектрограмме возрастает пропорционально квадрату частоты. Известно, что подобная структура возникает при приеме эллиптически поляризованного излучения на дипольную антенну, причем плоскость поляризации вращается при изменении частоты (эффект Фарадея). Многочисленные наблюдения показали, что спорадическое радиоизлучение Юпитера имеет высокую степень эллиптической поляризации [7]. В процессе распространения от источника до земного наблюдателя электромагнитные волны проходят три различные плазменные среды (магнитосферу Юпитера, межпланетное пространство, ионосферу Земли), и в каждой из этих сред может происходить двойное лучепреломление, обусловленное их магнитоактивными свойствами. При последующем распространении когерентных обыкновенной (О) и необыкновенной (Х) компонент с разной фазовой скоростью ориентация эллипса поляризации в картинной плоскости определяется как формой и положением составляющих его эллипсов О и Х волн, так и сдвигом фаз между ними. Сдвиг фаз меняется вдоль направления распространения, что приводит к вращению результирующего эллипса поляризации, т. е. к эффекту Фарадея. При приеме

на линейную антенну, когда большая ось эллипса параллельна антенне, возникает область высокой интенсивности (темные полосы), в том же случае, когда большая ось эллипса перпендикулярна антенне, – область низкой интенсивности (светлые полосы). Warwick и Dulk [19] первыми привлекли для объяснения структуры горизонтальных полос на динамических спектрах спорадического ДКМ излучения Юпитера эффект фарадеевского вращения эллипса поляризации при распространении в гиротропной неоднородной среде. До настоящего времени остается открытым вопрос о процентном соотношении вклада в наблюдаемый эффект каждой из сред распространения и, следовательно, об определении исходного направления осей эллипса поляризации в источнике.

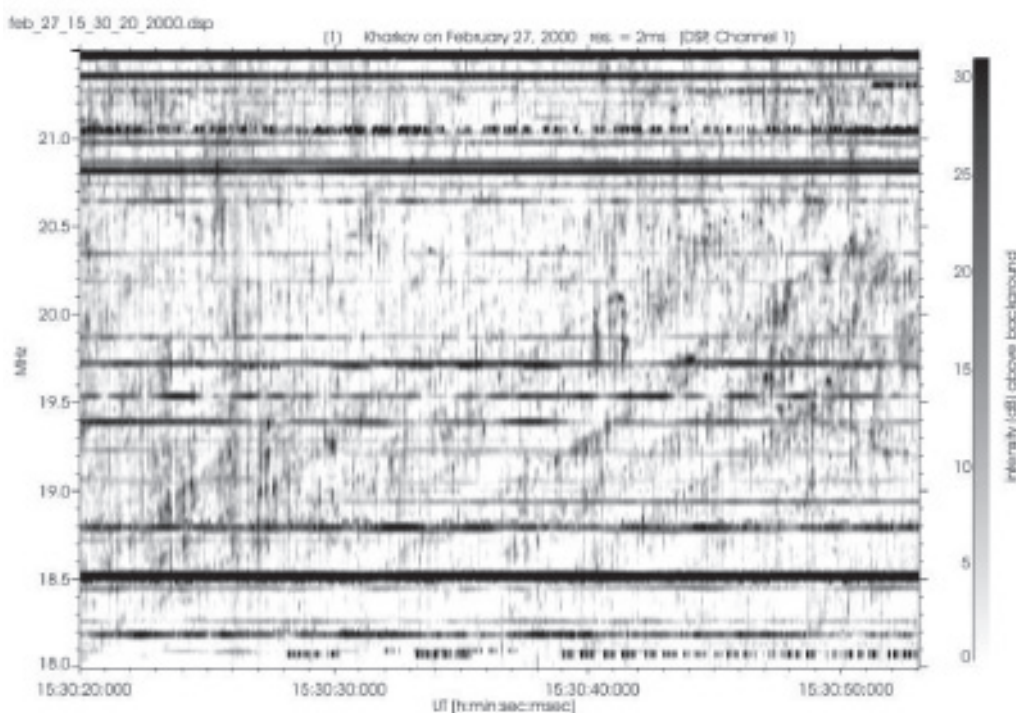
При достаточной чувствительности и разрешающей способности приемной аппаратуры фарадеевская модуляция ДКМ эмиссии Юпитера наблюдается практически всегда.

### 3.2. Модуляционные дорожки

Кроме модуляции за счет эффекта Фарадея, на динамических спектрах спорадического ДКМ излучения Юпитера наблюдаются “модуляционные дорожки” – система наклонных полос повышенной и пониженной яркости, которые впервые были описаны в работах [10-14]. Согласно классификации, предложенной Riihimaа и др. [14], динамические спектры с “модуляционными дорожками” делятся на три типа: спектры типа L2 с положительным наклоном полос (частота излучения растет со временем), спектры типа L4 с отрицательным наклоном полос и спектры типа L3, представляющие суперпозицию L2 и L4. Рис. 2 и 3 иллюстрируют структуры L3 и L2 соответственно. Следует заметить, что на рис. 2 четко видны два вида модуляции: фарадеевские полосы и “модуляционные дорожки” с разными наклонами. Проведенные в нашей работе наблюдения частично подтвердили результаты, полученные другими авторами. Было установлено, что среднее расстояние по частоте между соседними “модуляционными дорожками” составляет примерно  $100 \div 300$  кГц, средняя скорость дрейфа – 100 кГц/с, а глубина мо-



**Рис. 2.** Динамический спектр ДКМ эмиссии Юпитера со структурой модуляционных полос L3 (источник Io-B)



**Рис. 3.** Динамический спектр ДКМ эмиссии Юпитера со структурой модуляционных полос L2 (источник Io-B)

дуляции – порядка нескольких децибел. Эти значения не противоречат данным, приведенным в литературе. Знак дрейфа обнаружи-

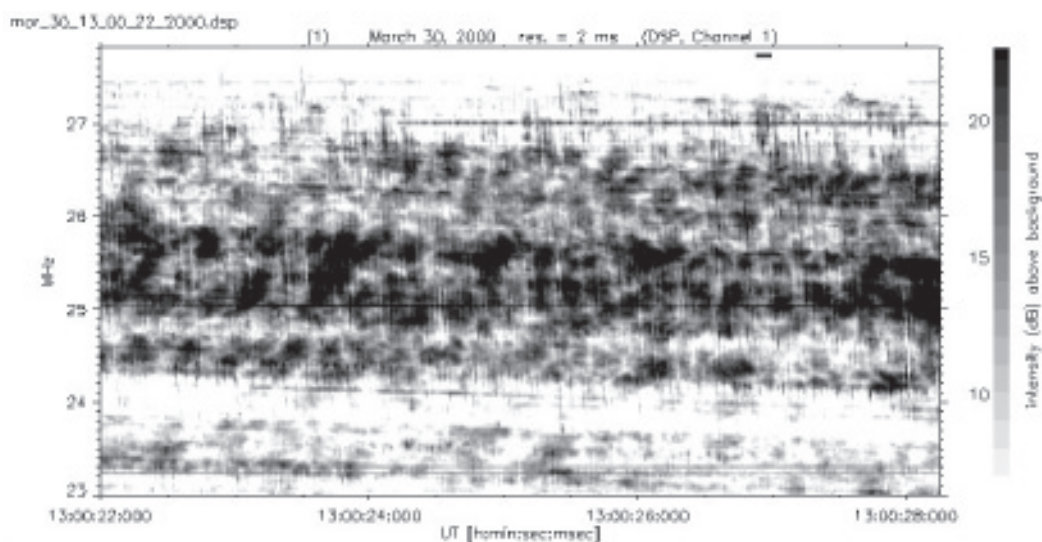
вает сильную зависимость от долготы центрального меридиана, что в литературе является одним из наиболее весомых аргументов

в пользу того, что наблюдаемый эффект может происходить в магнитосфере Юпитера. К сожалению, нам трудно согласиться с этой гипотезой, либо опровергнуть ее. Статистика наших наблюдений такова, что модуляционные дорожки в излучении источника Ио-А (долгота центрального меридиана  $\approx 240^\circ$ ) в 80 % случаев имеют отрицательный знак дрейфа, а 20 % событий – это суперпозиция линий с отрицательным и положительным частотными дрейфами. Модуляционные особенности источника Ио-В (долгота центрального меридиана  $\approx 120 \div 150^\circ$ ) характеризуются в основном суперпозицией линий с разными знаками ( $\sim 80\%$ ), модуляционные дорожки с отрицательным либо только с положительным наклоном появляются на динамических спектрах в равной степени ( $\sim 10\%$  и тех и других соответственно).

Проведенный нами анализ большого количества экспериментальных данных, полученных с помощью высокочувствительной приемной аппаратуры, позволил впервые с уверенностью утверждать, что эффект “модуляционных дорожек” на динамических спектрах присутствует всегда. Визуально он становится заметен на спектрах с времен-

ным разрешением  $1 \div 100$  мс и временем регистрации порядка десятков секунд. Кроме того, в отличие от существующих литературных данных, нами было обнаружено, что и кривизна дорожек и величина частотного дрейфа L2 и L4 для события L3 не всегда одинаковы (см. рис. 4). Следует особо отметить необычность спектра, приведенного на рис. 4, где S-излучение модулировано интенсивными пятнистыми образованиями со средней продолжительностью 0.4 с, которые, в свою очередь, образуют систему пересекающихся полос с быстрой отрицательной  $\sim 40$  МГц/с и медленной положительной  $\sim 1.2$  МГц/с частотами дрейфа.

В работе [16] авторами впервые был описан еще один вид частотно-временной вариации на динамическом спектре – “высокочастотные дорожки”, проявляющиеся в небольшой области в высокочастотной части всплеска. Эти полосы имеют маленькую глубину модуляции интенсивности. Их частотный дрейф всегда отрицателен, и его величина обычно находится в интервале между  $-5$  и  $-50$  кГц/с. В отличие от модуляционных дорожек типа L4 их абсолютная величина скорости дрейфа возрастает с час-

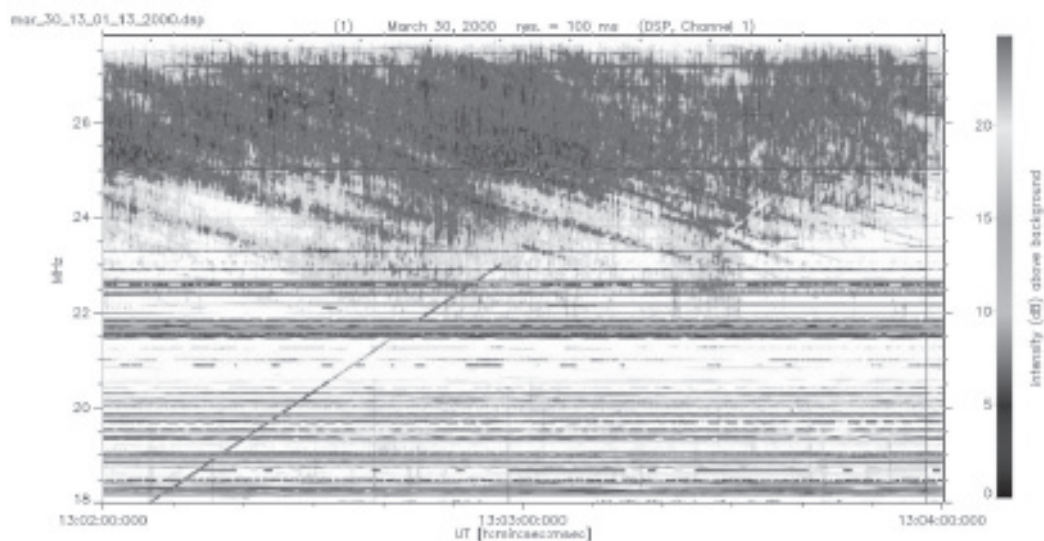


**Рис. 4.** Необычный динамический спектр: S-излучение модулировано интенсивными пятнистыми образованиями со средней продолжительностью 0.4 с, которые, в свою очередь, образуют систему пересекающихся полос с быстрой отрицательной  $\sim 40$  МГц/с и медленной положительной  $\sim 1.2$  МГц/с частотами дрейфа (источник Ио-В)

тотой. Они обычно характерны для источника Ио-В, а при низких значениях долготы центрального меридиана могут наблюдаться и для Ио-А области. На рис. 5 приведен один из примеров динамического спектра с “высокочастотными дорожками”, полученный с помощью DSP на УТР-2.

Несмотря на более чем тридцатилетнюю историю исследования эффекта “модуляционных дорожек”, в литературе обсуждаются в основном две гипотезы относительно механизма их происхождения. Согласно первой гипотезе (наиболее ранней) такие модуляционные структуры возникают благодаря эффекту Коттона–Мутона в магнитосфере или ионосфере Юпитера [10, 17], т. е. в результате распространения излучения через область с поперечным или квази-поперечным магнитным полем. Согласно второй гипотезе “модуляционные дорожки” возникают благодаря прохождению излучения через дифракционный экран, расположенный либо вблизи внешней границы магнитосферы Юпитера [14], либо в плазменном торе Ио [18, 22]. Заметим, что дифракция излучения на неоднородностях в плазменном торе Ио предложена в [18] и в качестве при-

чины появления арочных структур в L-всплесках. Однако до настоящего времени не ясно, существуют ли условия для реализации первой гипотезы, и нет экспериментальных подтверждений того, что в плазменном торе Ио формируется существующая всегда плазменная структура, которая могла бы играть роль дифракционного экрана для ДКМ излучения. Теоретически не разработан механизм образования такой структуры. Имеющиеся наблюдательные данные не позволяют указать характерные признаки, по которым можно было бы отличить динамические спектры с “модуляционными дорожками”, сформированные тем или другим механизмом. Такие признаки можно было бы найти из анализа поляризационных наблюдений. Действительно, если, например, “модуляционные дорожки” образуются на динамическом спектре благодаря реализации эффекта Коттона–Мутона на каком-либо участке вдоль пути распространения излучения от источника на Юпитере до приемника на Земле, то должна наблюдаться смена направления смещения “модуляционных дорожек” на половину частотного интервала при смене знака регистрируемой поляризации



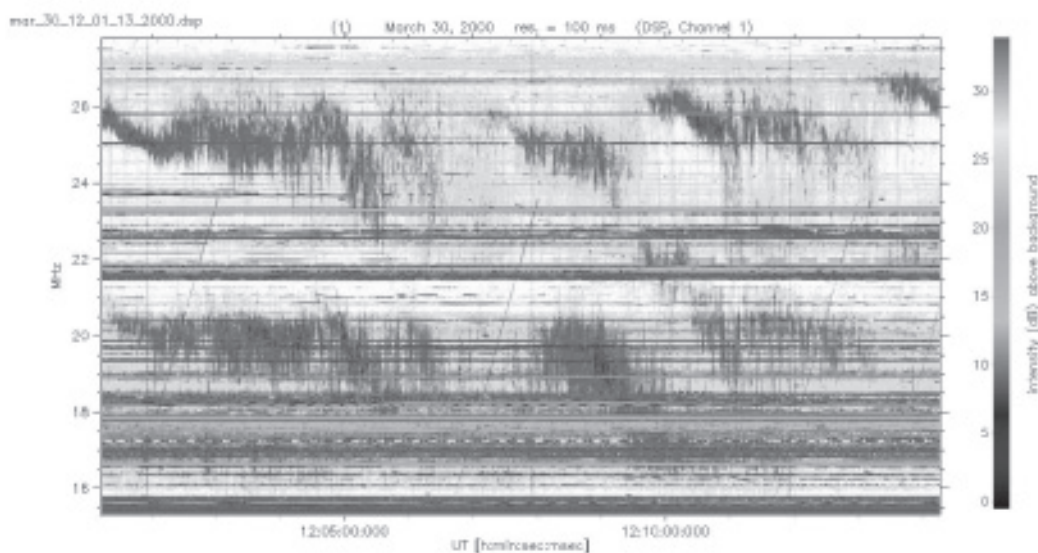
**Рис. 5.** Динамический спектр излучения Юпитера с “высокочастотными дорожками”, полученный с помощью DSP на УТР-2, (источник Ио-В)

при приеме на циркулярно-поляризованную антенну. В случае их дифракционного происхождения также могут наблюдаться характерные поляризационные особенности, обусловленные присутствием в излучении необыкновенных и обыкновенных волн, имеющих разные поляризации и отличающиеся коэффициенты преломления. Однако пока данных наблюдений поляризации излучения в “модуляционных дорожках” очень мало, и они весьма неопределенны.

В литературе (см., например, [16]) существует еще одна, менее развитая, гипотеза, суть которой заключается в том, что на спектр ДКМ излучения Юпитера оказывают влияние дрейфующие межпланетные неоднородности. Нам кажется более перспективным предположение о модуляции декаметровый эмиссии дрейфующими ионосферными неоднородностями, которые создают в ионосфере характерные квазигармонические структуры, способные играть роль дифракционного экрана при прохождении через них сигналов Юпитера. В дальнейшем предполагается более детально рассмотреть этот механизм.

### 3.3. Другие виды модуляционных структур ДКМ излучения Юпитера

Некоторые виды модуляции, наблюдаемые на динамических спектрах декаметровой эмиссии Юпитера, были приведены в работе Рябова [23]. В ней, например, было отмечено, что длинные серии S-всплесков концентрируются внутри спектральных полос с шириной от 1.5 до 5 МГц и расстоянием между центральными частотами полос порядка 3.5 МГц. Полосы могут иметь как отрицательный, так и положительный частотный дрейф. В результате проведенных на УТР-2 и DSP экспериментов также были получены подобные полосовые структуры. В наших экспериментах за счет чувствительной приемной аппаратуры с высоким частотно-временным разрешением оказалось возможным уточнить полученные в [23] характеристики. В некоторых случаях удалось увидеть более сложное строение этих полосовых структур. В качестве примера на рис. 6 показан динамический спектр с ярко выраженными двумя спектральными полосами, содержащими длинные серии S-всплесков. Расстояние между центральными частотами



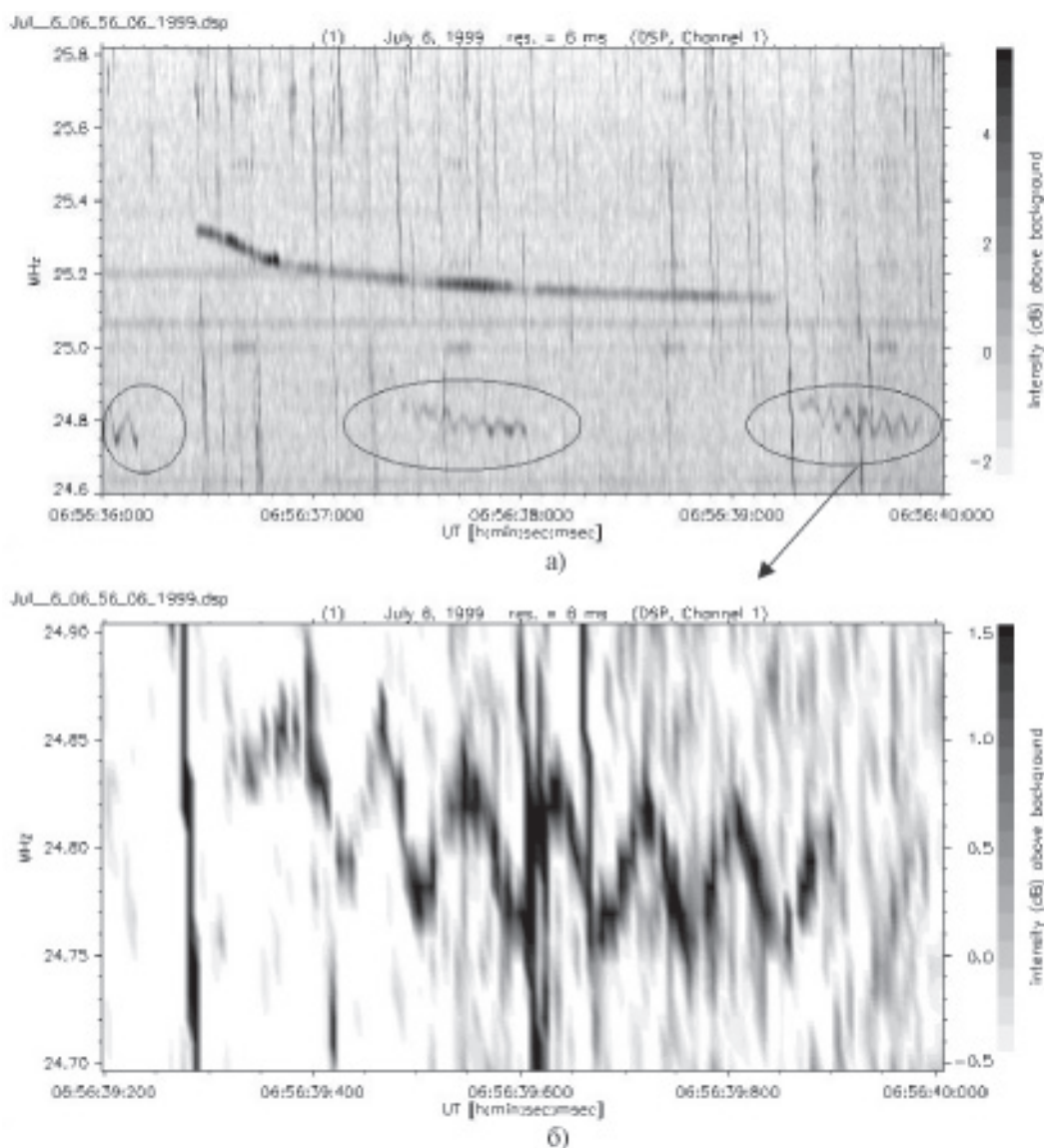
**Рис. 6.** Динамический спектр излучения Юпитера с ярко выраженными двумя спектральными полосами, содержащими длинные серии S-всплесков, (источник Io-B)



полос достигает приблизительно 6 МГц. Не наблюдается дрейфа полос по частоте. На спектре ясно видна нерегулярная частотная модуляция излучения в каждой полосе. В то же время имеет место сильная корреляция низкочастотных огибающих и полное отсутствие корреляции для событий более мелких масштабов между полосами.

На рис. 7, а приведен пример необычного спектра, содержащего на фоне класси-

ческого S-излучения ряд последовательных квази-гармонических структур, дрейфующих по частоте (отрицательный дрейф). Увеличенный фрагмент этого события показан на рис. 7, б. Видно, что вся структура состоит из отдельных полос различной продолжительности, каждая из которых имеет отрицательный наклон. Нами было обнаружено не менее десяти подобных спектров в различные дни наблюдений. Для доказа-



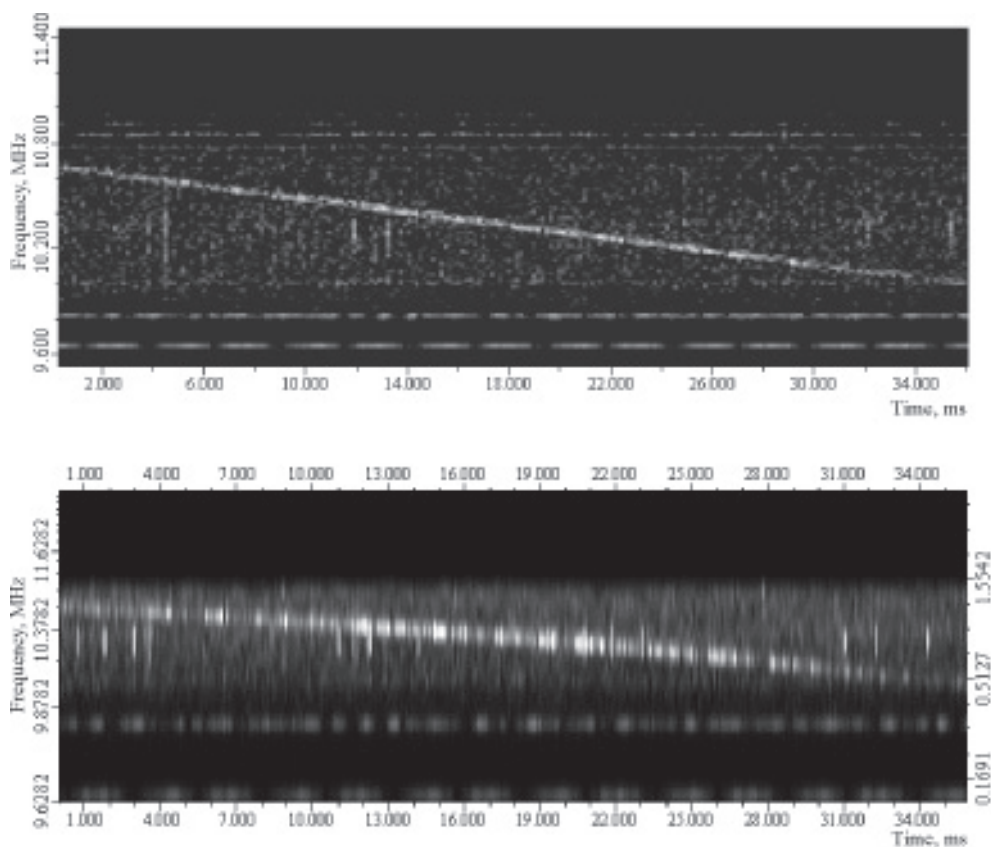
**Рис. 7.** Необычный спектр (источник Io-A), содержащий на фоне классического S-излучения ряд последовательных квази-гармонических структур, (а). Увеличенный фрагмент спектра (б)

тельства юпитерианской природы данного явления требуется более детальное исследование, в частности, эксперименты в режиме ON - OFF, а также на разнесенных антеннах.

### 3.4. Микроструктура простых S-всплесков

В работах [24, 25] исследовалась внутренняя “тонкая” структура фундаментальных декаметровых миллисекундных S-всплесков Юпитера. На рис. 8 приведен характерный пример из статьи [25] обработки простого линейно-дрейфующего S-всплеска с помощью метода Фурье (верхний спектр) и вейвлетного преобразования (нижний спектр). Всплеск длительностью 35 мс (частота оцифровки исходных данных 50 МГц) был выделен из записи Ио-С бури Юпитера (26 февраля 2000 г.), полученной с помощью приемного

устройства прямой регистрации (WFR) на телескопе УТР-2. Исследуемый сигнал имеет отрицательную скорость частотного дрейфа  $-27$  МГц/с и длительность на фиксированной частоте  $\sim 1$  мс. Из рисунка ясно видно, что простой S-всплеск состоит из серии коротких импульсов с длительностью порядка  $6 \div 15$  мкс, которые, в свою очередь, объединены в отдельные группы длительностью от 20 до 150 мкс. Следует отметить, что в работе [24] подобная отдельная группа рассматривалась как единое событие и получила название “субимпульс”. В работе [25] впервые было показано, что “суб-импульсы” состоят из еще более тонких структур (микроимпульсов) с временными масштабами от 6 до 15 мкс, интервалами между соседними импульсами  $5 \div 25$  мкс, и мгновенной полосой частот единичного микроимпульса



**Рис. 8.** Динамический спектр простого линейно-дрейфующего S-всплеска, полученный методом Фурье (а) и методом вейвлетного преобразования (б), (источник Ио-С)

100 ÷ 300 кГц. Кроме того, было обнаружено, что такие группы микросекундных импульсов сами по себе не имеют частотного сдвига, характерного для всего всплеска. Был сделан вывод, что полный частотный дрейф простого линейного S-всплеска является результатом последовательного изменения частоты составляющих его микроимпульсов. В свете современного уровня знаний о свойствах юпитерианской магнитосферы, межпланетного пространства, земной магнитосферы и ионосферы можно утверждать, что микросекундные пульсации не могут возникнуть ни в одной из этих областей на пути распространения сигнала к наблюдателю. Поэтому для объяснения обнаруженной внутренней микросекундной структуры (“субимпульсы”-группы, микроимпульсы) простого S-всплеска Юпитера в [25] рассматривались различные механизмы генерации излучения в самом источнике ДКМ S-всплесков.

На рис. 9 показана внутренняя структура простых S-всплесков, полученная путем изменения масштаба визуализации спектра. Отчетливо видно, что всплеск состоит из серии микросекундных импульсов, появляющихся в результате сложных модуляций по времени и частоте.

Еще один пример сложного динамического спектра S-всплесков (источник Ио-В) приведен на рис. 10. Частотно-временное разрешение на верхнем рисунке составляет 8 кГц и 128 мкс, что позволяет увидеть z-образную огибающую всплесков. Нижний рисунок содержит фрагмент этого спектра с временным разрешением 4 мкс и частотным – 250 кГц, демонстрирующий сверхтонкую структуру.

Как видно из огибающей спектров, излучение зарождается в точке z и эволюционирует по двум ветвям: первая – узкополосное излучение с полосой  $\Delta f_1 \approx 10$  кГц и отрицательным частотным дрейфом, вторая – излучение с более широкой полосой  $\Delta f_2 \approx 100$  кГц, которое имеет практически нулевой дрейф.

Одна из существующих точек зрения предполагает, что механизм образования S-всплеска с отрицательным частотным дрейфом представляет собой циклотронно-мазерное излучение электронов в потоковых трубках, соединяющих Юпитер с его спутником Ио. Генерация происходит на локальной гирочастоте электронов, движущихся от планеты в сторону Ио соответственно адиабатическому движению электронов в монотонно слабеющем планетном магнит-

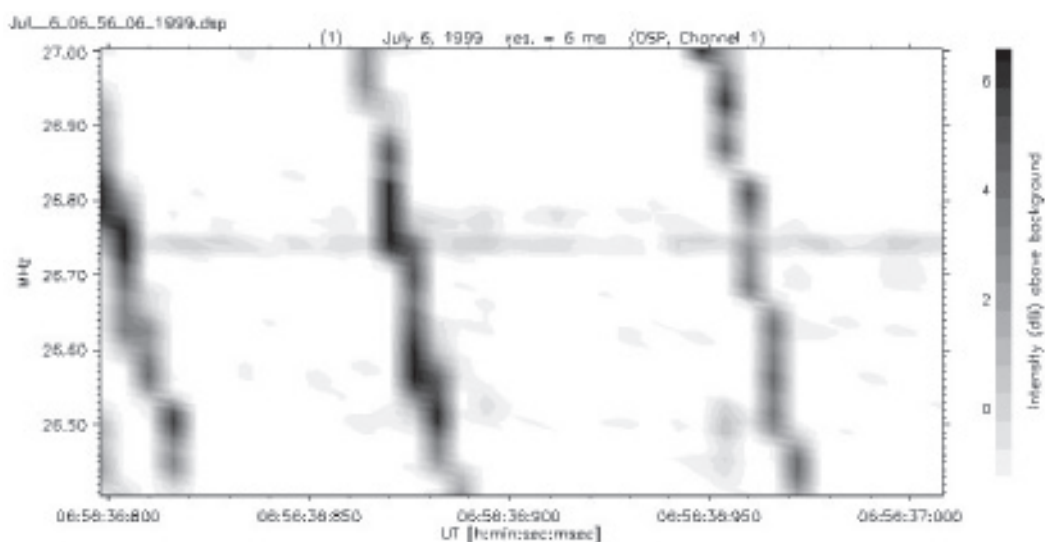
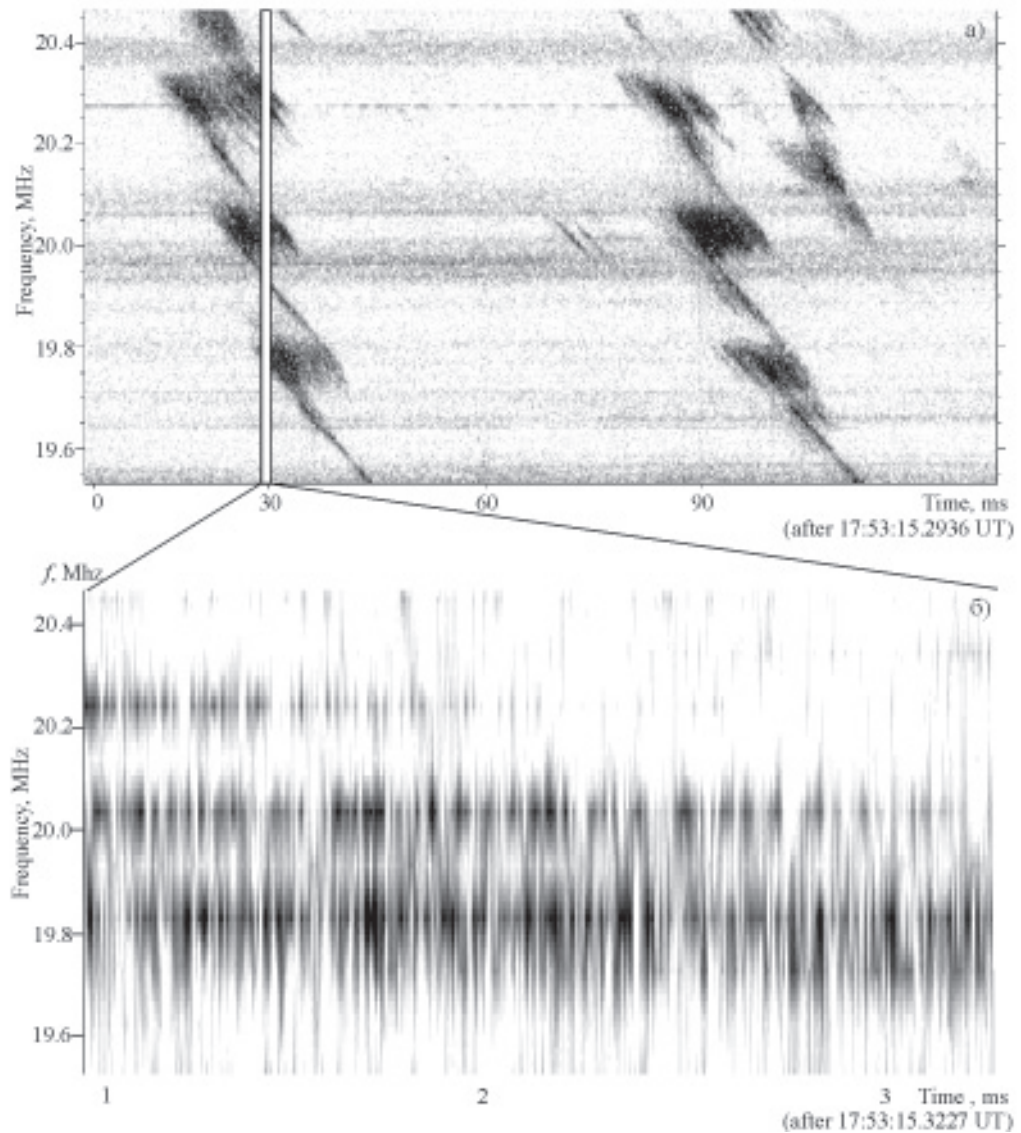


Рис. 9. Пример спектра “тонкой” внутренней структуры простых S-всплесков, полученный путем изменения масштаба визуализации спектра



**Рис. 10.** Пример z-образного динамического спектра (источник Io-B), полученного на УТР-2 и DSP, (а). Сверхтонкая структура S-всплеска (б)

ном поле. С другой стороны, горизонтальная ветвь z-образной огибающей указывает на то, что часть электронного потока трубки Ио оказывается в зоне магнитной неоднородности с квазистабильным полем на время около 10 мс. Такая неоднородность может быть обусловлена азимутальными электрическими токами в магнитосфере Юпитера на высотах  $(1.1 \div 1.2)R_j$ , которые искажают собственное поле планеты. Тем не менее еще раз отметим, что механизмы запуска и остановки генерации в пределах S-всплеска пока остаются неясными.

### Заключение

В работе исследованы динамические спектры ДКМ эмиссии Юпитера, полученные в период с 1999 по 2006 гг. в результате измерительных кампаний на телескопе УТР-2 с помощью новой высокоэффективной регистрирующей аппаратуры. Показано, что чувствительность и частотно-временное разрешение всего приемно-измерительного комплекса являются оптимальными для изучения параметров и характерных особенностей радиоизлучения Юпитера. Основное внимание

было уделено обзору и анализу различного вида модуляционных эффектов, проявляющихся на динамических спектрах в зависимости от частотно-временного разрешения, достигаемого в экспериментах либо полученного с помощью специальных математических методов обработки данных. Кроме того, модуляционные события рассматривались в зависимости от масштаба визуализации спектра. В настоящей работе не ставилась целью детальная теоретическая интерпретация возможных физических механизмов, способных вызвать тот или иной вид модуляции.

Результатом комплексного анализа большого количества широкополосных динамических спектров ДКМ эмиссии планеты явилось подтверждение и уточнение характеристик уже известных модуляционных событий и обнаружение новых, до настоящего времени не описанных в литературе, видов модуляций.

Без сомнения, дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования ДКМ излучения Юпитера, включая модуляционные эффекты, имеют хорошие перспективы. Особо следует отметить возможности, появляющиеся в связи с созданием низкочастотных систем нового поколения LOFAR (Low Frequency Array) и LWA (Low Wavelength Array). Применительно к исследованиям спорадического излучения Юпитера эти возможности проанализированы в работах [40]. По идеологии построения и многим параметрам новые системы будут превосходить существующие в настоящее время. Вместе с тем УТР-2, УРАН, NDA как единая система будет незначительно уступать новым инструментам в тех задачах, где чувствительность важнее (например, в исследованиях Юпитера с высоким частотно-временным разрешением), чем возможности картографирования. Более того, в последнем случае именно совместное применение будущих и имеющихся инструментов (максимальная база около 3000 км) обеспечит максимальное угловое разрешение в определении размеров и положении источника излучения. Прием на разнесенных антеннах важен и для более надежного определения влияния помех и ионосферы на принимаемые сигналы, а также оценки

эффекта направленности излучения [28]. Совершенствование средств регистрации, архивации и обработки данных также повысит эффективность исследований.

Авторы благодарят проф. В. В. Зайцева за плодотворные дискуссии и помощь в процессе подготовки публикации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта INTAS 03-5727.

## Литература

1. Burke B. F. and Franklin K. L. Observations of a variable radio source associated with planet Jupiter // *J. Geophys. Res.* – 1955. – Vol. 60, No. 2. – P. 213-217.
2. Flagg R. S. and Desch M. D. Simultaneous multi-frequency observations of Jovian S-bursts // *J. Geophys. Res.* – 1979. – Vol. 84, No. 8. – P. 4238-4244.
3. Goertz C. K. The current sheet of Jupiter magnetosphere // *J. Geophys. Res.* – 1976. – Vol. 81, No. 19. – P. 3368-3372.
4. Genova F. and Leblanc Y. Interplanetary scintillation and Jovian DAM emission // *Astron. Astrophys.* – 1981. – Vol. 98, No. 1. – P. 133-139.
5. Litvinenko G. V., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Ryabov B. P., and Shaposhnikov V. E. Noise nature investigation of sporadic Jovian decameter emission // *Radio Sci.* – 2000. – Vol. 35, No. 6. – P. 1445-1454.
6. Ryabov B. P. Jovian S-emission: decametric high-sensitivity observations and model of radiation source: in *Planetary Radio Emission III* / Edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and M.L. Kaiser. – Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, – 1992. – P. 125-144.
7. Рябов Б. П., Герасимова Н. Н. Декаметровое спорадическое излучение Юпитера. – Киев: Наукова Думка, 1990. – 237 с.
8. Zaitsev V. V., Zlotnik E. Ya., Shaposhnikov V. E. The origin of S-bursts in Jupiter's decametric radio spectra // *Astron. Astrophys.* – 1986. – Vol. 169, No. 1/2. – P. 345-354.
9. Zarka P. Hot Jupiter and Magnetized Stars: in *Planetary Radio Emission VI* / Edited by H. O. Rucker, W. S. Kurth, and G. Mann. – Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 2006. – P. 543-569.
10. Gordon M. A., Warwick J. M. High time-resolution studies of Jupiter's radio bursts // *Astrophys. J.* – 1967. – Vol. 148. – P. 511-533.
11. Riihimaa J. J. Structured events in the dynamic spectra of Jovian L bursts // *Astron. J.* – 1968. – Vol. 73. – P. 265-270.
12. Riihimaa J. J. Modulation Lanes in the Dynamic Spectra of Jovian L Bursts // *Astron. Astrophys.* – 1970. – Vol. 4. – P. 180-191.

13. Riihima J. J. S-bursts in Jupiter's decametric radio spectra // *Astrophys. Space Sci.* – 1977. – Vol. 56. – P. 503-508.
14. Riihima J. J., Dulk G. A., Warwick J. W. Morphology of the fine structure in the dynamic spectra of Jupiter's decametric radiation // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1970. – Vol. 19. – P. 175-192.
15. Lecacheux A., Meyer-Vernet N., Daigne G. Jupiter's decametric radio emission: a nice problem of optics // *Astron. Astrophys.* – 1981. – Vol. 94, No. 2. – P. L9-L12.
16. Genova F., Aubier M. G., Lecacheux A. Modulations in Jovian Decameter Spectra: Propagation Effects in Terrestrial Ionosphere and Jovian Environment // *Astron. Astrophys.* – 1981. – Vol. 104. – P. 229-239.
17. Железняков В. В., Шапошников В. Е. О происхождении “модуляционных линий” на динамическом спектре декаметрового излучения Юпитера // *Астрон. Ж.* – 1979. – Т. 56, №5. – С. 1042-1053.
18. Meyer-Vernet N., Daigne G., Lecacheux A. Dynamic spectra of some terrestrial ionospheric effects at decametric wavelengths applications in other astrophysical contexts // *Astron. Astrophys.* – 1981. – Vol. 96. – P. 296-310.
19. Warwick J. W., Dulk G. A. Faraday rotation on decametric radio emission from Jupiter // *Science.* – 1964. – Vol. 145, No. 3630. – P. 380-383.
20. Lecacheux A. Spectral study of the polarization of the decametric radiobursts // *Astron. Astrophys.* – 1976. – Vol. 49. – P. 197-202.
21. Ladreiter H. P., Litvinenko G. V., Boudjada M. Y. and Rucker H. O. Faraday rotation in Jupiter's decametric radio emission used for remote sensing of the terrestrial ionosphere and the emission's region at Jupiter // *Planet. Space Sci.* – 1995. – Vol. 43. – P. 1595-1605.
22. Imai K., Wang L., Carr T. D. Modeling Jupiter's decametric modulation lanes // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, No. A4. – P. 7127-7137.
23. Рябов Б. П. Спорадическое излучение Юпитера. Мультимасштабные динамические спектры // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2001. – Т. 6, №1. – С. 103-130.
24. Carr T. D. and Reyes F. Microstructure of Jovian decametric S-bursts // *J. Geophys. Res. Space.* – 1999. – Vol. 104. – P. 127-136.
25. Litvinenko G. V., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Leitner M., and Shaposhnikov V. E. Internal structure of the Jovian simple S-burst obtained with the wavelet analysis technique // *Astron. Astrophys.* – 2004. – No. 426. – P. 343-351.
26. Kleewein P., Rosolen C., Lecacheux A. New Digital Spectrometers for Ground-Based Decameter Radio Astronomy: in *Planetary Radio Emissions IV* / Edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer A., and Lecacheux A. – Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1997. – P. 349-357.
27. Leitner M., Rucker H. O. Waveform Analysis Technique of Jovian S-burst Observations: in *Planetary Radio Emission V* / Edited by H. O. Rucker, M. L. Kaiser, and Y. Leblanc – Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 2001. – P. 91-95.
28. Rucker H. O., Lecacheux A., Konovalenko A. A., Leitner M. New Frontiers in Decameter Radio Astronomy: in *Planetary Radio Emission V* / Edited by H. O. Rucker, Kaiser M. L., and Leblanc Y. – Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 2001. – P. 51-76.
29. Декаметровый радиотелескоп УТР-2 / Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. – Антенны. Сб. статей. Вып. 26 / Под ред. А. А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1978. – С. 3-15.
30. Boishot A., Rosolen C., Aubier M. G., et al. A new high gain, broadband, steerable array to study Jovian decameteric emission // *Icarus.* – 1980. – Vol. 43, No. 3. – P. 399-407.
31. Brazhenko A. I., Bulatsen V. G., Vashchishin R. V. New decameter radio polarimeter URAN-2 // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.* – 2005. – Vol. 5. – P. 43-46.
32. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., et al. The new preamplification system for UTR-2 radio telescope // *Experimental Astronomy.* – 2001. – Vol. 11. – P. 85-112.
33. Lecacheux A., Rosolen C., Clerc V., et al. Digital techniques for ground-based low frequency radio astronomy // *Proceedings SPIE.* – 1998. – Vol. 3357. – P. 533-542.
34. Lecacheux A., Konovalenko A. A., Rucker H. O. Using Large radio telescope at decameter wavelength // *Planet. Space Sci.* – 2004. – Vol. 52. – P. 1357-1374.
35. Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H. O. New instrumentation and methods for the low frequency planetary radio astronomy: in *Planetary Radio Emission V* / Edited by H. O. Rucker, Kaiser M. L., and Leblanc Y. – Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 2001. – P. 63-67.
36. Thompson A. R., Moran J. M., and Swenson G. W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy.* – A Wiley-interscience publication, 1986. – 534 p.
37. Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets // *Commun. Pure Appl. Math.* – 1988. – Vol. 41. – P. 909-996.
38. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *УФН.* – 1996. – Т. 166, №11. – С. 1145-1169.
39. Коэн Л. Время-частотные распределения: Обзор // *ТИИЭР.* – 1989. – Т. 77, №10. – 45 с.
40. The Low Frequency Array (LOFAR) and (Extra-) Solar System Science // *Planet. Space Sci. Special Issue* / Edited by I. De Pater, N. Kassim, H. O. Rucker. – 2004.

**Модуляційні ефекти на динамічних спектрах спорадичного декаметрового випромінювання Юпітера**

**Г. В. Литвиненко, А. Лекашо,  
Г. О. Рукер, О. О. Коноваленко,  
Б. П. Рябов, В. В. Виноградов,  
В. Є. Шапошников, У. Таубеншусс**

Експериментально досліджуються різні типи модуляційних ефектів, що проявляються на динамічних спектрах спорадичного декаметрового випромінювання Юпітера. Аналізуються широкосмугові дані, отримані за допомогою високотехнологічних експериментальних засобів. Спектральні особливості, параметри модуляції, вірогідність виникнення на динамічному спектрі розглядаються у залежності від часової роздільної здатності, досягнутої в експериментах, та від масштабу візуалізації. Досліджуються і уточнюються характеристики як вже відомих модуляційних структур, так і отриманих уперше. Докладно описуються використана нова апаратура, методи та програма спостережень.

**Modulation Effects on Dynamic Spectra of Sporadic Jovian Decameter Emission**

**G. V. Litvinenko, A. Lecacheux,  
H. O. Rucker, A. A. Konovalenko,  
B. P. Ryabov, V. E. Shaposhnikov,  
V. V. Vinogradov, and U. Taubenschuss**

The variety of modulation structures in the Jovian decameter radio emission (DAM) has been investigated by experiments. The wide-band data taken for the present analysis have been obtained with the high-tech experimental equipment. Spectral features, modulation parameters and probability of occurrence on the dynamic spectra are analyzed versus time resolution achieved in the experiment, also versus visualization scale. Main characteristics of the already known and freshly detected modulation events are investigated and verified. The new instrumentation, methodology and observation program are described in detail.