

Борис Павлович! А не заняться ли Вам Юпитером?

Замечание С. Я. Брауде во время утреннего обхода своих лабораторий в сентябре 1980 г.

Спорадическое радиоизлучение Юпитера. Мультимасштабные динамические спектры

Б. П. Рябов

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

В новых радионаблюдениях Юпитера в 1998-2000 гг. в диапазоне 10÷40 МГц использовалась антенна УТР-2 совместно с акусто-оптическим спектрографом (АОС) с f - t разрешением 15 кГц – 5 мс и свиппирующим анализатором спектра. Получены обзорные динамические спектры бурь S-излучения и значительное количество новых высокочувствительных динамических спектров S-всплесков тонкой структуры в сплошном частотном диапазоне от 10 до 30 МГц. Рассмотрен процесс формирования асимметричного конуса S-излучения. Исследованы спектральные детали с пятью характерными частотно-временными масштабами от часов до миллисекунд. Рассмотрен ряд физических аспектов, связанных с формированием спектров S-всплесков сложной формы. Многие всплески показывают характерные черты самоподобных изображений с различным масштабом на частотно-временной плоскости.

Длинные серии S-всплесков концентрируются внутри полос шириной от 1.5 до 5 МГц, которые имеют положительный или отрицательный частотный дрейф до 17 кГц/с и разделены в среднем интервалом ~3.5 МГц. Предполагается, что такие спектральные полосы соответствуют крупным неоднородностям трубки Ио типа утолщений, где и происходит излучение S-всплесков. На основе полученных спектрограмм рассчитаны размеры неоднородностей, их местоположение и скорости движения по трубке Ио. Предполагаемая структура трубки Ио совместима с предложенной нами ранее моделью [34, 35] источника S-излучения.

У нових радіоспостереженнях Юпітера у 1998-2000 рр. в діапазоні 10÷40 МГц використовувалася антена УТР-2 разом з акусто-оптичним спектрографом (АОС) з f - t розділенням 15 кГц – 5 мс та свіппуючим аналізатором спектра. Отримано оглядові динамічні спектри бурь S-сплесків тонкої структури у суцільному частотному діапазоні від 10 до 30 МГц. Розглянуто процес формування асиметричного конуса S-випромінювання. Досліджено спектральні деталі з п'ятьма характерними частотно-часовими масштабами від годин до мілісекунд. Розглянуто низку фізичних аспектів, пов'язаних з формуванням спектрів S-сплесків складної форми. Багато сплесків показують характерні риси самоподібних зображень з різним масштабом на частотно-часовій площині.

Довгі серії S-сплесків концентруються усередині смуг шириною від 1.5 до 5 МГц, які мають додатний або від'ємний частотний дрейф до 17 кГц/с і розділені у середньому інтервалом ~3.5 МГц. Мається на увазі, що такі спектральні полоси відповідають крупним неоднорідностям трубки Іо типу потовщень, де і відбувається випромінювання S-сплесків. На основі отриманих спектрограм розраховано розміри неоднорідностей, їх місцезнаходження та швидкості руху по трубці Іо. Передбачувана структура трубки Іо сумісна із запропонованою нами раніше моделлю [34, 35] джерела S-випромінювання.

Введение

Открытие спорадического радиоизлучения Юпитера (1955 г.) [1] стало фундаментальным явлением. Оно привело к бурному развитию исследований в области планетной физики радиоастрономическими методами. С тех пор проведены многие сотни радионаблюдений планет как наземными средствами, так и с помощью космических аппаратов, которые значительно расширили наши представления о планетных магнитосферах, потоках заряженных частиц и механизмах генерации радиоволн в космических условиях.

Юпитер излучает в широком диапазоне – от миллиметровых до километровых радиоволн, но особый и неослабевающий интерес вызывает спорадическое радиоизлучение. Оно представляет собой весьма интенсивные радиовсплески, появляющиеся в диапазоне частот от 100 кГц до 39.5 МГц в виде широкополосных шумовых радиобурь, длительностью в несколько часов. На выходе широкополосного спектрографа спорадическое излучение обнаруживает сугубо нестационарный характер: разброс амплитуд радиовсплесков в течение одной бури достигает $50 \div 60$ дБ. Динамические спектры бурь содержат ярко выраженные характерные детали, частотно-временные ($f-t$) масштабы которых имеют разброс в тысячи раз по частоте и времени. Исторически сложилось так, что различают две основные компоненты эмиссии, L и S. На выходе амплитудного детектора узкополосного радиоприемника L-компонента имеет вид шумового напряжения, которое флуктуирует с временным масштабом порядка $1 \div 100$ с, а S-компонента – это короткие радиоимпульсы длительностью на одной частоте от 1 до 100 мс. Отличительными особенностями S-всплесков являются их узкополосность, мгновенная полоса частот всплеска около 50 кГц и отрицательный частотный дрейф. Частотная полоса существования всплеска непостоянна, она флуктуирует в пределах $1 \div 6$ МГц. Всплески типа L и S могут появляться раздельно либо вместе, представляя собой аддитивную или мультипликативную смеси компонент. Существуют всплески

и с промежуточными частотно-временными $f-t$ масштабами.

Юпитерианское спорадическое радиоизлучение зависит от орбитального положения спутника Юпитера Ио [2, 3]. Отсюда возникло разделение на зависящую и независимую от Ио компоненты эмиссии. При этом L-излучение испытывает лишь частичный контроль со стороны Ио, а S-компонента практически полностью контролируется токовой системой Юпитер-Ио. Существует точка зрения, что все спорадическое излучение Юпитера так или иначе связано с Ио. Дальнейшие исследования подтвердили предположение, что источник генерации S-всплесков локализован в токовой трубке, соединяющей Юпитер с Ио и вытянутой вдоль силовой линии дипольного магнитного поля планеты.

Анализ амплитудно-частотных динамических спектров показал, что S-компонента обнаруживает поразительно разнообразную и сложную структуру в частотно-временной и пространственной областях. По мере совершенствования техники эксперимента возрастали чувствительность радиотелескопов и разрешающая способность аппаратуры по частоте и времени. В результате были обнаружены новые детали спектров [4, 5] и установлены связи параметров эмиссии с целым рядом физических процессов в зоне генерации, в магнитосфере планеты, трубке Ио и пространстве, окружающем сам спутник Ио. Поэтому ясно, почему значительная часть усилий исследователей неизменно направляется на изучение S-всплесков.

Неизведанной областью пока остаются динамические спектры фазы S-всплесков. Эти вопросы уже изучаются [6], но подробные данные могут быть получены только с помощью широкополосных и скоростных цифровых анализаторов на основе быстрого преобразования Фурье.

1. Результаты наблюдений

Структура динамических спектров S-компоненты юпитерианской радиоэмиссии изучается уже более 40 лет [2, 3, 6-27]. Несмотря на то, что в ряде работ была достигнута высокая

разрешающая способность по частоте и времени (10 кГц – 300 мкс), вследствие недостаточной чувствительности, ширины диапазона рабочих частот или времени сопровождения планеты лучом радиотелескопа полученные данные были подвержены эффекту наблюдательной селекции и не допускали всесторонней физической интерпретации.

До наблюдений Юпитера [28-32], выполненных на радиотелескопе УТР-2 [33] в Харькове, радиобури изучались фрагментарно, т. е. не были изучены в комплексе полные динамические спектры радиобурь зависящего от Ио излучения. Адекватные исследования требуют длительного сопровождения планеты, регистрации сигналов в широком диапазоне частот (>15 МГц) при минимальной плотности потока около 10 Ян. Проведенные в начале 80-х годов наблюдения бурь S-излучения на УТР-2 удовлетворяли всем этим требованиям. Они позволили выяснить в деталях пространственно-частотную структуру диаграммы направленности (ДН) S-компоненты [32], оценить геометрическую структуру самой трубки Ио, а также ее эволюцию за время бури [5].

На основе полученных наблюдательных данных предложена физическая модель источника излучения и механизм, ответственный за генерацию S-компоненты юпитерианской радиоэмиссии [34, 35]. Модель хорошо согласуется с большинством известных параметров излучения: частотно-угловыми параметрами конической ДН, оценками местоположения источника генерации относительно планеты [29-31], структурой планетного магнитного поля [36-38], тонкой структурой динамических спектров и частотными дрейфами S-всплесков [4, 14, 15, 17-19, 23], и рядом других характеристик эмиссии.

Задача новых спектральных исследований состояла в том, чтобы проследить эволюцию тонкой структуры S-всплесков одновременно с крупномасштабными спектрами всей бури и установить взаимную связь спектральных деталей с различными характерными $f-t$ масштабами.

2. Аппаратура и обработка данных

Исследования, проведенные в 1994-2000 гг., выполнены с применением новой спектральной аппаратуры, расширившей возможности радиотелескопа УТР-2.

В последние годы развивается продуктивное сотрудничество в изучении Юпитера между Радиоастрономическим институтом НАН Украины, Астрофизической обсерваторией Париж-Медон и Институтом космических исследований Австрийской академии наук. Уникальная комбинация одной из крупнейших декаметровых антенных решеток УТР-2 с французским акусто-оптическим спектрографом (АОС) и 30-канальным анализатором телескопа УТР-2 с быстродействующей системой цифровой регистрации позволила получить качественно новые данные [4, 5, 39-49]. Для изучения крупномасштабных деталей спектра использовался последовательный анализатор фирмы Хьюлетт-Паккард (hp) с $f-t$ разрешением 30 кГц – 500 мс. В результате удалось получить мультимасштабные динамические спектры спорадического радиоизлучения Юпитера в диапазоне частот от 10 до 40 МГц.

Акусто-оптический спектрограф имеет 866 параллельных частотных каналов в диапазоне частот шириной 26 МГц и $f-t$ разрешение 30 кГц – 5 мс. Его амплитудная характеристика линейна по мощности, а число уровней дискретизации составляет 4096.

Многоканальный анализатор незаменим в декаметровом диапазоне, где обычно действуют сильные станционные помехи. Его частотная характеристика задана числом приемников (обычно 30), настроенных на свободные от помех частоты с шагом от 50 до 500 кГц, и полосой пропускания одного канала $1 \div 14$ кГц. Быстродействие системы регистрации определяется 30-канальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и равно 2 мс.

Первичные данные наблюдений обработаны посредством специально созданных для этой цели алгоритмов и компьютерных программ. Они дают возможность получить цветные или черно-белые изображения динамических спектров S-всплесков в координатах амплитуда-частота-время в виде трехмерных кар-

тин в изометрии или с яркостной индикацией интенсивности. Программы обнаруживают S-всплески Юпитера в условиях неизбежных в декаметровом диапазоне помех от радиостанций и сильного космического фона. С этой целью в каждом канале производится свертка последетекторной реализации с откликом оптимального фильтра для выделения импульсных сигналов и подавления помех от радиостанций. Одновременно выполняется нелинейное амплитудное преобразование типа возведения в степень или логарифмирования в зависимости от необходимости выделить слабые или сильные сигналы и производится адаптивная частотно-временная интерполяция дрейфующих S-всплесков. Программы позволяют в ряде случаев восстановить истинную частотно-временную структуру динамических спектров S-всплесков, т. е. несколько улучшить первичное разрешение спектроанализатора. Так, может быть повышена разрешающая способность акусто-оптического спектрографа по времени за счет некоторой избыточности в частотном разрешении, а в многоканальном анализаторе улучшение частотного разрешения достигается за счет его повышенного быстродействия.

3. Характерные масштабы динамических спектров

На основе наблюдений Юпитера, проведенных на УТР-2 в 1996-2000 гг., получена новая информация о зависящем от Ио излучении, при этом исследованы как интегральные динамические спектры радиобурь, так и подробная детализация промежуточных f - t масштабов и тонкой структуры. Спектры представлены на длительном временном интервале: непрерывное слежение за планетой достигает 6 часов. Они имеют широкий частотный диапазон, $10 \div 30$ МГц, а диапазон плотностей потоков составляет $10^2 \div 10^7$ Ян.

Большинство спектров изображено на f - t плоскости с яркостно-цветовой индикацией интенсивности. На рис. 1 приведен пример мультимасштабного динамического спектра радиобури зависящего от Ио излучения (источник Io-B), имевшей место 8 июня 1997 г.

Как видно из рис. 1, в юпитерианском излучении, в основном, выделяются пять спектральных масштабов, за каждый из которых, по видимому, ответствен свой физический механизм. Условно можно определить следующие типы динамических спектров с соответствующими средними размерами f - t деталей:

Типы динамических спектров	f - t масштаб
а) Крупномасштабный спектр бури в целом	10 МГц – 60 мин
б) Спектр излучения неоднородностей трубки Ио	3 МГц – 3 мин
в) Статистический спектр S-компоненты	3 МГц – 3 с
г) Серии S-всплесков 3 МГц-30 мс	3 МГц – 30 мс
д) Тонкая структура индивидуальных S-всплесков	0.3 МГц – 5 мс

Рассмотрим типы спектров источников зависящего от Ио излучения в их связи с механизмом генерации [34, 35], характеристиками направленности и физическими процессами в активной зоне трубки Ио.

4. Спектры радиобурь и направленность излучения

Мощные бури радиоизлучения наблюдаются в так называемых источниках зависящего от Ио излучения Юпитера. Этим источникам соответствуют определенные зоны на координатной плоскости “орбитальный угол Ио Φ_{Io} – долгота центрального меридиана Юпитера λ_{III} ”. Наиболее мощные источники с максимальной частотой эмиссии около $35 \div 38$ МГц локализованы в двух зонах Io-B и Io-C с координатами $\Phi_{IoB} \approx 90^\circ \pm 30^\circ$, $\lambda_{III} \approx 90 \div 150^\circ$ и $\Phi_{IoC} \approx 240^\circ \pm 30^\circ$, $\lambda_{III} \approx 300 \div 30^\circ$, соответ-

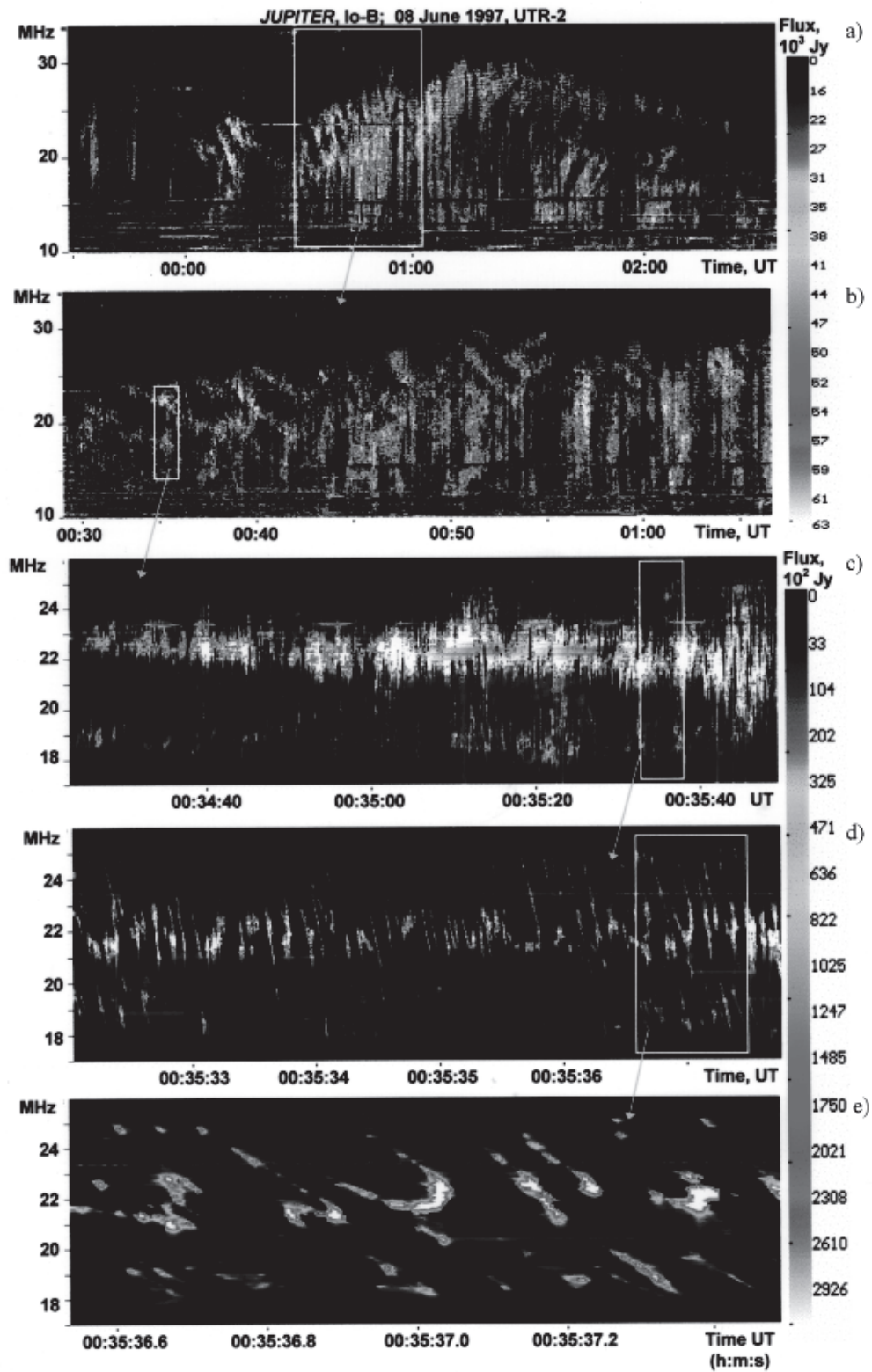


Рис. 1. Мультимасштабный динамический спектр радиобури источника Ио-В 8 июня 1997 г.:
 а) крупномасштабный спектр бури в целом; б) спектр излучения неоднородностей трубки Ио; в) статистический спектр S-компоненты; д) серии S-всплесков; е) спектры тонкой структуры. Стрелки указывают на увеличенные фрагменты спектров, очерченные рамкой на соответствующей верхней панели

ственно. В тех же полосах Φ_{Io} обычно выделяют низкочастотные источники Io-A, Io-B₁, Io-D, которые заметно слабее. Примеры динамических спектров бурь излучения источника Io-B показаны на рис. 2, а источника Io-C – на рис. 3. На этих рисунках видны крупномасштабные детали и дрейфы бурь в целом, которые служат основой для выяснения средней конфигурации и частотной структуры диаграммы направленности излучателя.

На рис. 4, а приведена схема системы Юпитер-Ио, поясняющая природу и характерные черты зависящего от Ио излучения. Диаграмма направленности представляет собой полый тонкостенный конус с тупым углом 2Ψ при вершине [32, 50, 51], а ось конуса направлена по касательной к трубке Ио в месте генерации. Показаны два положения конуса излучения, при которых наблюдатель регистрирует либо источник Io-B, либо Io-C в зависимости от того, в какой из стенок конуса находится луч зрения. На этом рисунке также отмечен активный интервал X трубки Ио, излучающий всплески. Сама трубка здесь изогнута: ее проекция на экваториальную плоскость имеет форму дуги, что ведет к асимметрии конуса и появлению сложных форм динамических спектров тонкой структуры.

Для приема S-излучения необходимо два основных условия: существование спорадической генерации S-всплесков в трубке Ио и совпадение луча зрения наблюдателя с направлением волнового вектора S-компоненты. Возникновение генерации тесно связано со скоростью движения основания трубки относительно плазмы в ближней магнитосфере [29-31], местным магнитным полем и рядом других факторов. Таким образом, образование отдельных источников на плоскости $\Phi_{\text{Io}} - \lambda_{\text{III}}$ происходит вследствие наложения двух факторов: 1) вариаций эмиссионной активности (зависящей от λ_{III}) вблизи полярных областей Юпитера, и 2) наблюдательного эффекта при сканировании конусом излучения за счет орбитального движения Ио (изменение Φ_{Io}). Источники Io-B и Io-C соответствуют главному максимуму активности при долготе иовиграфического меридиана трубки Ио $\lambda_{\text{IIIю}} \approx 240^\circ$. Вторичный максимум активности соответствует долготе

$\lambda_{\text{IIIю}} \approx 45^\circ$, с которой связаны источники Io-A, Io-B₁ и Io-D.

Крупномасштабные спектры бурь дали возможность установить частотную структуру ДН: во внешнюю поверхность конуса излучаются гармоники с наиболее низкими частотами, а при движении внутрь конуса частота растет. Как видно на рис. 2, бури источника Io-B всегда имеют положительный частотный дрейф, т. к. в этом случае луч зрения наблюдателя вначале пересекает внешнюю поверхность конуса с низкочастотными составляющими и затем движется внутрь конуса. Детали спектров бурь источника Io-C имеют отрицательный дрейф (см. рис. 3), т. к. луч зрения вначале пересекает внутреннюю поверхность конуса (высокие частоты) и затем движется к внешней поверхности. Из рис. 3 видно также, что конус имеет многослойную структуру.

В результате анализа спектров, приведенных на рис. 2 и рис. 3, рассчитаны углы конуса. На долготе $\lambda_{\text{IIIю}} \approx 240^\circ$ конус излучения резко асимметричен: при приеме источника Io-B угловая ширина стенки конуса δ_1 не более 0.5° , а противоположная стенка конуса δ_2 (источник Io-C) достигает 8° . Этот результат сразу следует из того, что длительности радиобурь τ_B и τ_C источников Io-B и Io-C, подчиняются соотношению:

$$\tau_B \ll \tau_C.$$

При $\lambda_{\text{IIIю}} \approx 240^\circ$, согласно нашим данным на частоте 22 МГц, угол раскрытия конуса 2Ψ в среднем около 170° и с понижением частоты растет до $\sim 179^\circ$. Углы Ψ , δ_1 и δ_2 существенно зависят также от долготы $\lambda_{\text{IIIю}}$ [32].

Во втором максимуме активности трубки, при $\lambda_{\text{IIIю}} \approx 45^\circ$, угол 2Ψ уменьшается до 140° , а стенки конуса симметризируются: $\delta_1 \approx \delta_2 \approx 5^\circ$.

Различны и механизмы формирования спектров тонкой структуры в этих источниках. Наиболее сложные формы S-всплесков на $f-t$ плоскости наблюдаются в источнике Io-C, в то время как источник Io-B генерирует мощные, но сравнительно простые спектры всплесков.

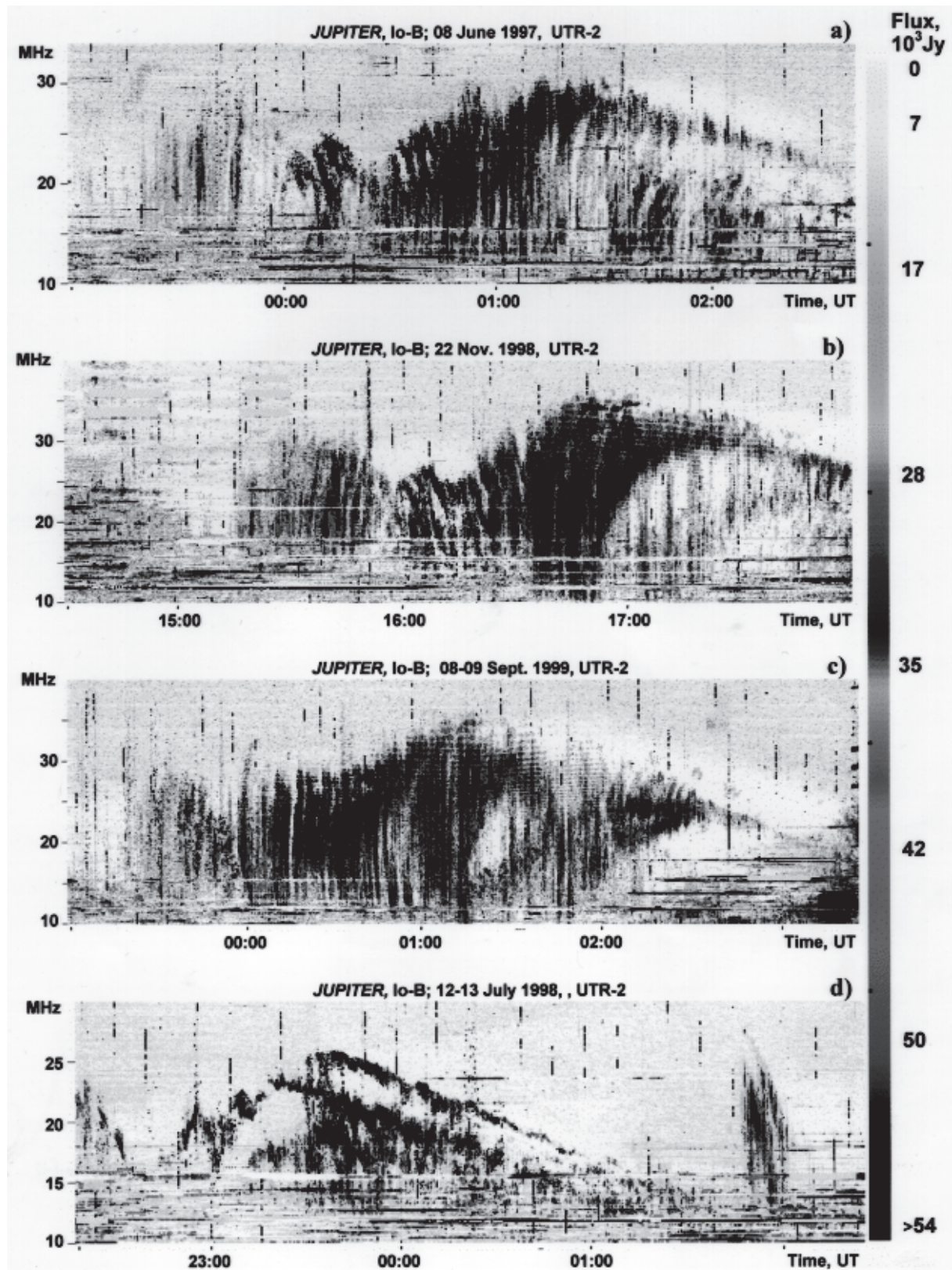


Рис. 2. Обзорные крупномасштабные спектры бурь радиоизлучения источника Io-B: a), b), c), d) – различные даты наблюдений, с близкими значениями Φ_{Io} и λ_{III} в течение бури

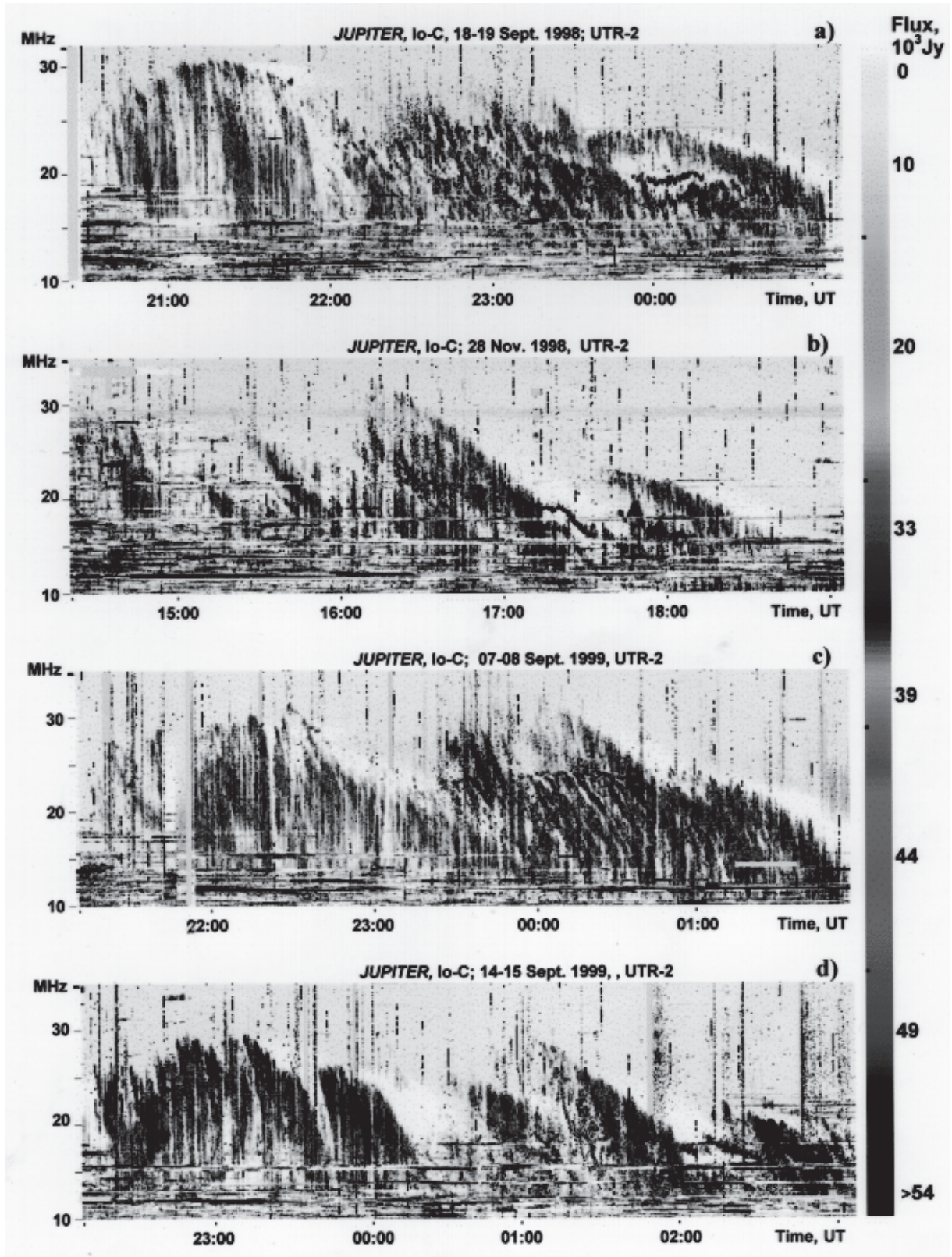
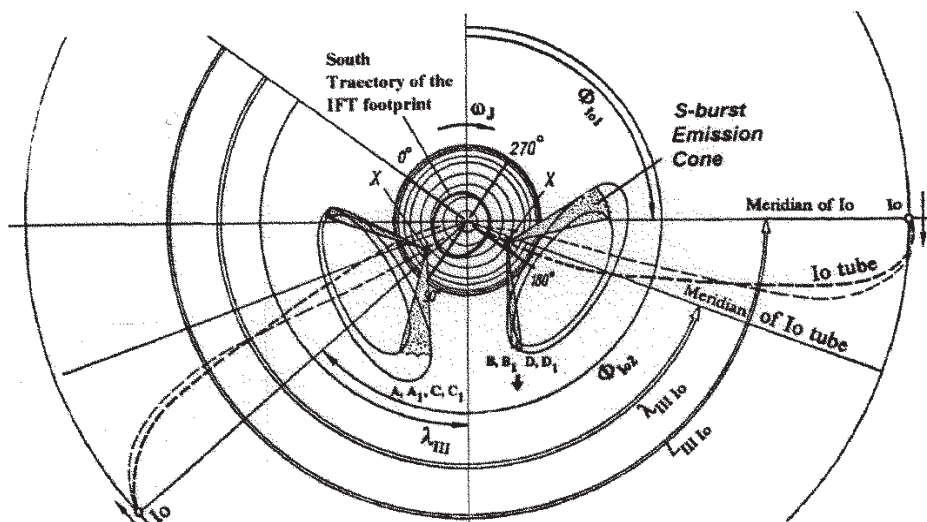
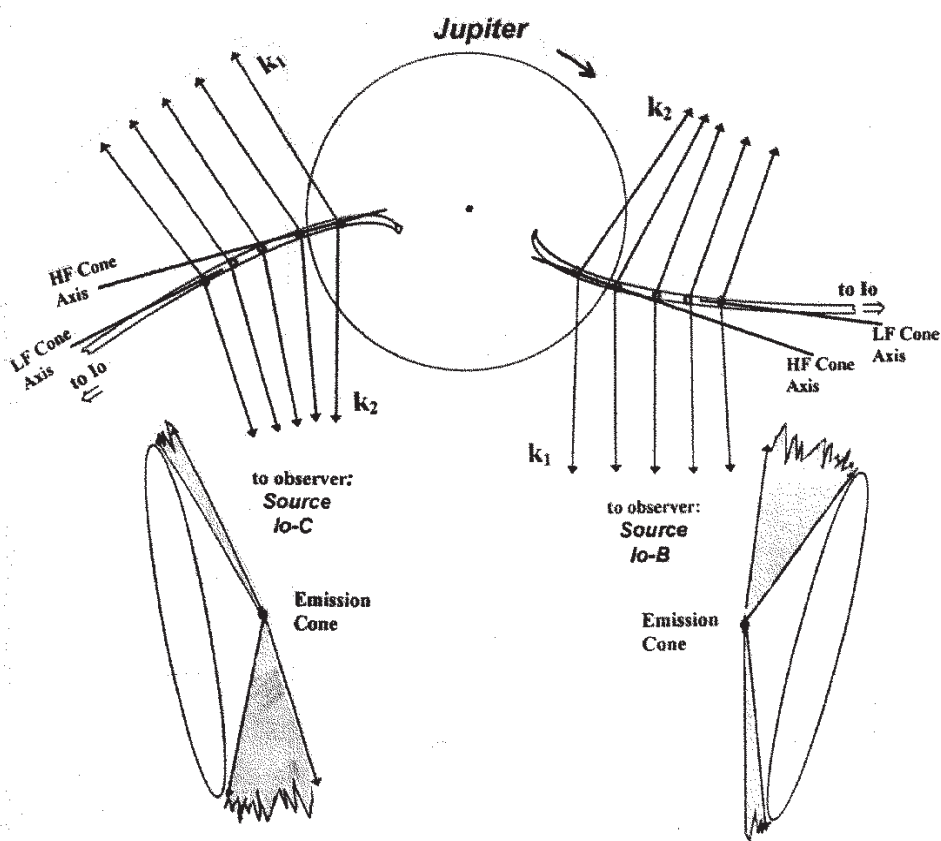


Рис. 3. Обзорные крупномасштабные спектры бурь радиоизлучения источника Ио-С: a), b), c), d) – различные даты наблюдений, с близкими значениями Φ_{Io} и λ_{III} в течение бури



a)



b)

Рис. 4. Формирование асимметричного конуса S-излучения:
 а) геометрическая конфигурация системы Юпитер-Ио;
 б) схема, поясняющая возникновение асимметрии конической диаграммы направленности

Дальнейший анализ динамических спектров и структуры конуса излучения требует рассмотрения физической модели источника и механизма генерации S-всплесков.

5. Модель источника спорадического излучения

Общепринятой теоретической модели излучателя S-всплесков пока нет, что объясняется сложностью и разнообразием физических процессов в источнике генерации. Предложенные недавно механизмы излучения и обзоры на эту тему [43, 52-56] дают весьма полное представление о проблеме. Задача затрудняется тем, что существующие обширные наблюдательные характеристики эмиссии таковы, что часть данных прекрасно соответствует той или иной теоретической концепции, при этом остальные наблюдательные факты ей в корне противоречат. Обычно, чем детальнее разработана теория, тем более узкий класс особенностей эмиссии она объясняет. До недавнего времени не было даже качественной теории, объясняющей все особенности S-эмиссии с единой точки зрения.

Возможно, что интерпретация процесса излучения S-всплесков может быть сделана в терминах самоорганизующихся критических явлений, что согласуется с предложенной моделью излучателя юпитерианских всплесков [34, 35].

Данная модель отличается тем, что базовую роль в ней играет азимутальное магнитное поле \mathbf{B}_T , создаваемое электрическим током i_T , протекающим по трубке Ио вдоль силовой линии собственного поля планеты \mathbf{B}_J . Тогда при величинах $i_T \geq 5 \cdot 10^8$ А [57] магнитное поле в месте генерации становится существенно нелинейным, т. к. образуется результирующее винтовое поле

$$\mathbf{B}_S = \mathbf{B}_J + \mathbf{B}_T,$$

напряженность которого максимальна на поверхности трубки. На оси трубки Ио напряженность азимутального поля B_{T0} близка к нулю, поэтому там доминирует собственное

поле планеты \mathbf{B}_J , вдоль которого движется основной электронный поток. Очевидно, что некоторая часть электронов, локализованных на поверхности трубки Ио, будет двигаться вдоль винтового поля \mathbf{B}_S .

5.1. Механизм генерации

Так как магнитный диполь Юпитера наклонен на $\sim 10^\circ$ относительно оси вращения планеты и сдвинут от центра на $0.1R_J$, то излучающий интервал трубки Ио движется с неравномерными угловой и линейной скоростями. Другими словами, основание трубки колеблется вокруг равномерно вращающегося юпитерианского меридиана, проходящего через Ио (см. рис. 4, а), и возбуждает поперечные колебания, распространяющиеся вдоль трубки в виде альвеновских волн.

Альвеновская волна, возникшая вблизи Юпитера, движется к Ио и возбуждает длительный импульс ЭДС на Ио. Импульс стимулирует возрастание электрического тока i_T в трубке до $\sim 5 \cdot 10^8$ А и создает рост напряженности локального магнитного поля за счет появления азимутальной составляющей \mathbf{B}_T от тока i_T .

Элементарные токовые нити в поверхностном слое трубки Ио могут рваться под действием электродинамических сил, возникающих вследствие различия угловых скоростей трубки и плазмы ближней магнитосферы. Разрыв волокон есть результат силового воздействия на трубку Ио инерционных дрейфовых токов, текущих поперек линий поля \mathbf{B}_J . При высокой поперечной скорости движения трубки \mathbf{v}_s сквозь ближнюю магнитосферу Юпитера удельное силовое воздействие на трубку F_j достигает, возможно, критических значений. Величина F_j определяется следующим выражением:

$$F_j = \mathbf{J} \times \mathbf{B}_J = \sum q N_q \mathbf{v}_s \times \mathbf{B}_J,$$

где \mathbf{J} – плотность дрейфового тока; q , N_q – заряд и концентрация частиц коротящей магнитосферы; суммирование производится по различным сортам ионизированных частиц.

Таким образом, основной причиной разрывов является возрастание поперечной скорости

ти движения трубки \mathbf{V}_S сквозь ближнюю магнитосферу (за счет вращения смещенного от центра магнитного диполя) и силы тока i_T в цепи Юпитер-Ио. Максимумы локализованы на двух активных юпитерианских долготах $\lambda_{\text{шио}}$ вблизи 240° и 45° , где и наблюдаются экстремальные характеристики декаметровый эмиссии.

В месте разрыва элементарной токовой цепи возникает ЭДС самоиндукции

$$u_x = -\frac{L di_x}{dt},$$

где L – коэффициент самоиндукции, i_x – элементарный ток отдельной нити. Между концами лопнувшей нити образуется электрическое поле с локальной напряженностью порядка десятков МВ/м. Здесь происходит коллективное ускорение сгустков электронов до релятивистских скоростей, причем излучение получается синфазным в силу практически мгновенного появления ускоряющего импульса. Вектор скорости сгустка электронов \mathbf{v}_e направлен вдоль винтового магнитного поля \mathbf{B}_S , поэтому сгусток, двигаясь с релятивистской скоростью, генерирует магнитодрейфовое излучение за счет кривизны поля \mathbf{B}_S (curvature radiation). При распространении в поверхностном слое трубки (десятки км) излучение усиливается циклотронным мазером в узкой полосе на местной гирочастоте

$$f_s \approx 2.8B_S,$$

где f_s выражается в МГц, $B_S = (B_J^2 + B_T^2)^{1/2}$ – модуль суммарного магнитного поля, Гс. Электромагнитная волна, регистрируемая наблюдателем как всплеск S-излучения, имеет линейную поляризацию.

Энергия, выделившаяся в месте разрыва нити,

$$W_L = \frac{Li_x^2}{2},$$

возбуждает быструю магнитозвуковую волну, которая распространяется с альвеновской ско-

ростью нормально к винтовому полю \mathbf{B}_S . Подобный процесс вызывает разрывы соседних токовых нитей и образует дрейфующий всплеск на динамическом спектре в f - t координатах, который имеет время жизни до 100 мс и полюсу частот от 1 до 6 МГц. Эти параметры всплесков будут обоснованы ниже.

5.2. Формирование конуса излучения S-компоненты

Энергия излучения сгустка релятивистских электронов сосредоточена в карандашном луче с полушириной mc^2/E , который направлен вдоль вектора скорости \mathbf{v}_e . Очевидно, что вращение карандашного луча, к которому приводит движение сгустка электронов вдоль винтовой линии \mathbf{B}_S вокруг оси трубки Ио, создает хорошо известную ДН S-излучения в виде симметричного конуса с тонкими стенками.

Однако диаграмма направленности, измеренная в среднем за длительный интервал (примерно равный орбитальному периоду Ио – 42.5 ч), приобретает форму асимметричного конуса (см. рис. 4, а), что вызвано следующими причинами.

Длина интервала трубки Ио, излучающего в полосе $10 \div 35$ МГц, составляет около 30 тыс. км [31]. Вместе с тем размеры зоны излучения в узкой полосе частот и в данный момент времени намного компактнее – несколько км [34]. Генерация высоких частот происходит непосредственно над ионосферой Юпитера, а понижение частоты эмиссии связано с перемещением места генерации вверх по трубке Ио, где меньше напряженность локального магнитного поля. При удалении от поверхности Юпитера средний угол Ψ раскрыва конуса излучения увеличивается, т. к.

$$\Psi \sim \arctg(B_T/B_J),$$

где дипольное поле B_J быстро падает, а поле трубки B_T уменьшается незначительно. Величины B_J и B_T выражаются следующими формулами:

$$B_J \approx \zeta(\xi B_F^{-1/3} + h_s/2R_{jn})^{-3},$$

$$B_T \approx 10^{-6} \cdot 2i_T/r_s. \quad (9)$$

Здесь B_F – напряженность поля вблизи подошвы трубки Ио, Гс (равная ~ 10 Гс при $\lambda_{\text{шлю}} \approx 240^\circ$); ζ и ξ – размерные коэффициенты порядка единицы каждый; h_s – высота расположения излучателя в км, генерирующего на частоте f_s , МГц; R_{jn} – полярный радиус Юпитера, км; i_T выражается в А; r_s – радиус сечения трубки, км.

В работе [34] показано, что наблюдаемая асимметрия средних параметров конуса [32] возникает вследствие флуктуаций тока трубки i_T , соответствующих флуктуаций поля B_T , и значит хаотических колебаний направления волнового вектора. При этом высота расположения излучателя, генерирующего на частоте 15 МГц, флуктуирует в пределах интервала $l_s \approx 3300$ км при 20 % флуктуациях тока i_T . Иными словами, компактное место генерации на заданной частоте хаотически перемещается вверх-вниз по изогнутому интервалу трубки длиной в несколько тыс. км, вследствие чего средний конус излучения становится асимметричным.

Итак, наблюдаемая асимметрия конуса есть результат действия следующих факторов: а) искривления оси трубки Ио на активном интервале, б) увеличения Ψ с ростом высоты места генерации над поверхностью планеты и с) особой ориентации трубки Ио: при приеме источника Ио-В интервал трубки Ио сориентирован выпуклой стороной к наблюдателю, а для Ио-С – вогнутой стороной. Схема изогнутого интервала трубки Ио совместно с направляющими конуса излучения приведена на рис. 4, б. В случае приема источника Ио-В колебания оси конуса за счет движения излучателя по искривленной трубке компенсируются противофазными колебаниями угла Ψ и волновой вектор S-излучения k не отклоняется за пределы тонкой стенки конуса δ_1 . В случае источника Ио-С эти угловые колебания складываются, и тогда формируется широкая стенка конуса δ_2 .

К аналогичному эффекту приводит и перемещение излучателя по трубке Ио, связанное с изменением частоты эмиссии: с понижени-

ем частоты место генерации поднимается над планетой и угол конуса увеличивается, повышение частоты приводит к снижению излучателя с одновременным сужением раскрыва конуса. В результате широкополосный конус излучения становится асимметричным.

Флуктуации тока трубки являются причиной целого ряда других особенностей радиоизлучения системы. Например, разброс скоростей частотного дрейфа всплесков, измеренный на фиксированной частоте, также может быть объяснен флуктуациями тока трубки Ио. Ниже они рассматриваются в рамках данной модели на основе анализа динамических спектров среднего масштаба и статистических характеристик спектров S-всплесков.

6. Диагностика локальных неоднородностей трубки Ио

Кроме квазипостоянных деформаций излучающего интервала трубки Ио типа плавного изгиба оси, конфигурация трубки варьируется под действием электромагнитных сил с характерным временем порядка десятков минут. Это обусловлено флуктуациями электрического тока i_T в цепи Юпитер-Ио, что в свою очередь ведет к вариациям параметров локального магнитного поля и определяет параметры динамических спектров среднего масштаба.

Флуктуации тока вызваны долготными аномалиями физических условий на поверхности Юпитера в зоне подошвы трубки Ио, которые модулируют ее активность. Траектория движения подошвы трубки Ио в южной или северной полярной области планеты проходит через зоны с различной напряженностью магнитного поля. При этом варьируются как концентрация частиц, так и поперечная скорость движения трубки сквозь ближнюю магнитосферу планеты.

В результате наблюдаются скоррелированные вариации сразу нескольких параметров спорадического излучения: мощности излучения, его частотной полосы, поляризации, угловых параметров конуса излучения, вероятности появления S-всплесков и тонкой структуры динамических спектров.

Эти факторы определяют сложность и многообразие морфологии динамических спектров S-всплесков.

6.1. Спектральные полосы S-всплесков

Наблюдения Юпитера на УТР-2 в 1994-1999 гг. показали, что массивы S-всплесков чаще всего сосредоточены в узких спектральных полосах шириной от ~ 1.5 до 6 МГц, которые дрейфуют вниз или вверх по частоте. В диапазоне частот шириной около 15 МГц одновременно могут существовать до 3-х таких полос.

Спектральные полосы наблюдаются как в источнике Io-B, так и в Io-C, что подтверждает предположение о том, что эти источники соответствуют одному и тому же излучателю, но видимому при разных положениях конической ДН. Такие полосы S-всплесков составляют динамические спектры среднего масштаба, которые показаны на рис. 5 и рис. 6. На этих спектрах скорости дрейфов довольно велики и составляют $\sim 13 \div 14$ кГц/с, но возможен и значительно меньший дрейф полос, до ~ 3 кГц/с, что соответствует спектру, показанному на рис. 2, d.

Частотный дрейф спектральных полос с одновременным изменением их частотной полосы Δf_{sb} может быть интерпретирован как результат эволюции геометрической структуры трубки в процессе развития бури S-излучения.

6.2. Динамика крупномасштабной структуры трубки Ио

Согласно гипотезе, высказанной в работах [34, 35, 40], частотный масштаб спектральных полос с S-всплесками и зон молчания между ними соответствует геометрическому масштабу периодической модуляции диаметра трубки Ио, или, другими словами, характерной длине зон утолщения (“бульб”) трубки Ио, которые показаны на рис. 7. В этих зонах и происходит генерация S-компоненты. Учитывая значения частотного дрейфа спектральных полос, можно заключить, что неоднородности типа “бульб” и перетяжек движутся по трубке Ио. Положительный дрейф полос соответствует направлению движения в сто-

рону планеты, что видно на спектре, приведенном на рис. 5, b в интервале 01:10 ÷ 01:20 UT. Однако преобладает отрицательный дрейф полос как в источнике Io-B (см. рис. 5, c), так и в спектре источника Io-C, показанном на рис. 6.

Следуя известному постулату о генерации S-компоненты на циклотронной частоте электронов в локальном магнитном поле, можно на основе спектральных данных, аналогичных приведенным на рис. 5 и рис. 6, и модели магнитного поля [36-38] оценить скорость v_b движения бульб и характерную длину M_x в момент приема излучения. Используя динамический спектр, вычисляем скорость дрейфа по эмпирической формуле [34] для высоты h (в км) места генерации S-излучения над поверхностью Юпитера для активной долготы $\lambda_{\text{шио}} \approx 240^\circ$:

$$h \approx 1.46 \cdot 10^6 f^{-1.44},$$

где f – частота излучения в МГц, получаем оценку скорости движения “бульб” по трубке Ио:

$$v_b \approx \frac{dh}{dt} \approx \left(\frac{dh}{df} \right) \left(\frac{df}{dt} \right)_{sb}.$$

Можно показать, что характерная длина M_x (в км) неоднородностей (“бульб”) при условии их соответствия спектральным полосам S-излучения определяется по следующей формуле:

$$M_x \approx 2.1 \cdot 10^6 f^{-2.44} \Delta f_{sb}, \quad (1)$$

где Δf_{sb} – ширина спектральной полосы S-излучения в МГц.

Анализируя динамические спектры бурь S-всплесков 16 сентября 1999 г., удается проследить движение к Юпитеру одной из “бульб” трубки, в которой происходит генерация узкой, ~ 1.5 МГц, спектральной полосы S-излучения. Для спектра на рис. 5, b при $t \approx 01:10$ UT, $f = 23$ МГц и $(df/dt)_{sb} \approx 0.015$ МГц/с

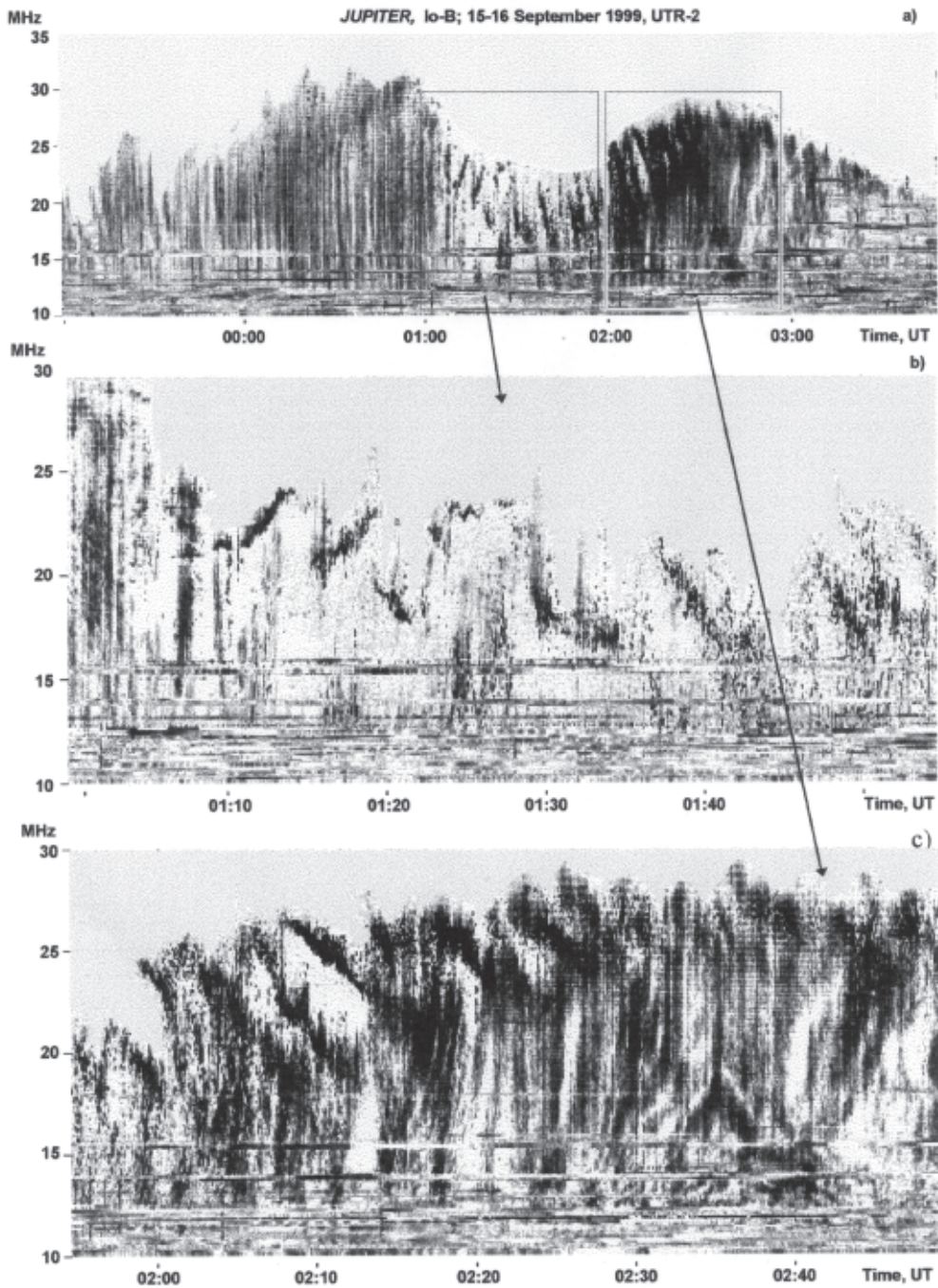


Рис. 5. Детализация динамических спектров источника Ио-В:

a) обзорный спектр бури S-излучения 15-16 сентября 1999 г.; b) спектральные полосы с положительным частотным дрейфом; c) спектральные полосы S-всплесков с отрицательным дрейфом. Стрелки указывают на увеличенные фрагменты спектра, выделенные рамками на обзорном спектре a)

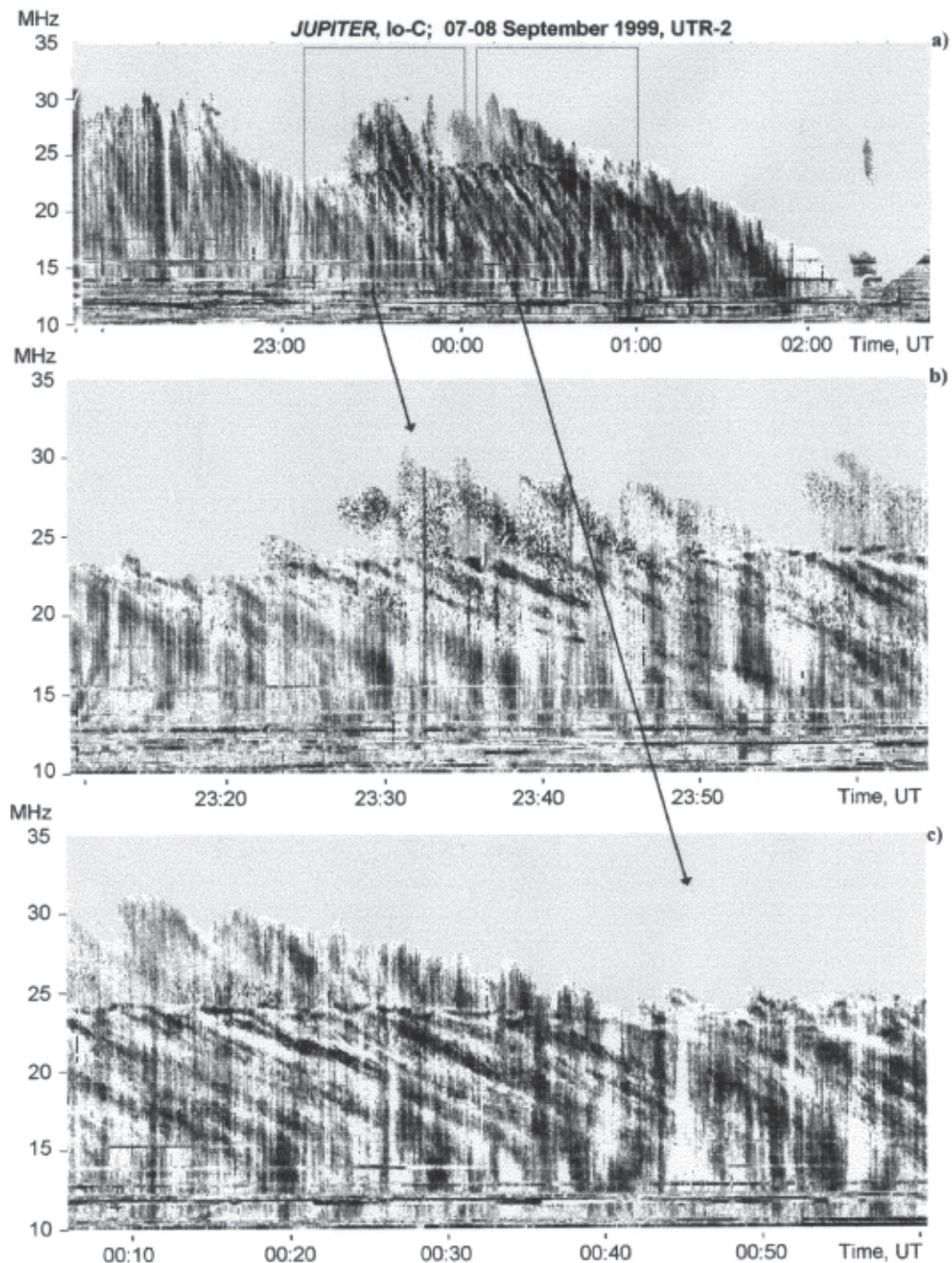


Рис. 6. Детализация динамических спектров источника Io-C:

a) обзорный спектр бури S-излучения 07-08 сентября 1999г.; b) спектральные полосы S-всплесков с отрицательным дрейфом в начале бури; c) то же самое в средней части бури. Стрелки указывают на увеличенные фрагменты спектра, выделенные рамками на обзорном спектре a)

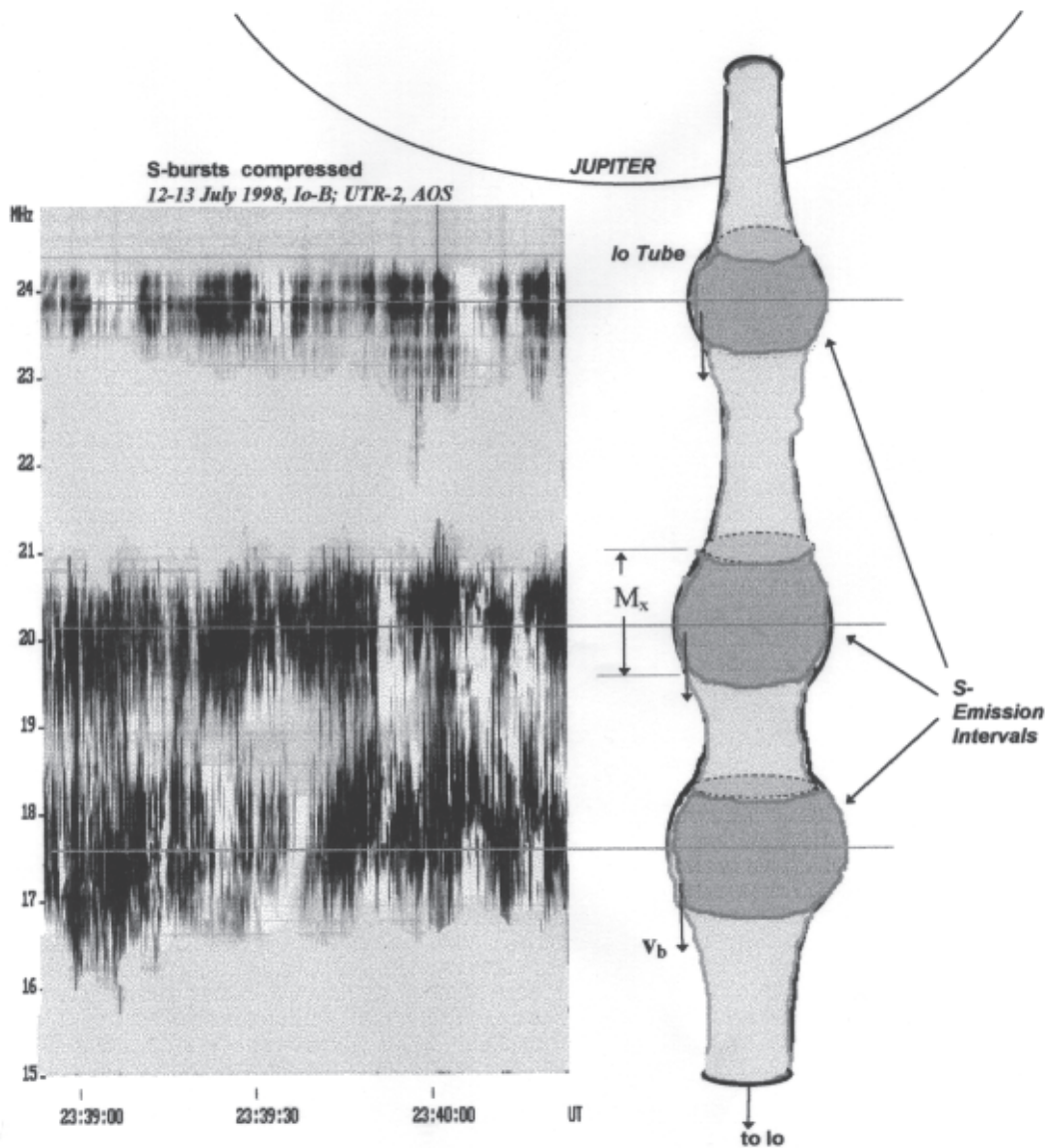


Рис. 7. Схема, поясняющая взаимосвязь спектральных полос S-всплесков с геометрической структурой трубки Ио

получаем $dh/df \approx 1000$ км/МГц и находим скорость данной неоднородности по трубке Ио: $v_b \approx 15$ км/с. По формуле (1) при $\Delta f_{sb} \approx 1.5$ МГц получаем ее характерный размер: $M_x \approx 1500$ км. Сохраняя свой размер, она некоторое время движется к Ио со средней скоростью $v_b \approx 15$ км/с.

На рис. 5, с показаны спектральные полосы S-всплесков с отрицательным дрейфом поряд-

ка 0.017 МГц/с и шириной 1.5 ÷ 4 МГц. При $t = 0.2:10$ UT одновременно существуют три полосы со средними частотами f_0 , равными 17, 20 и 25 МГц, что соответствует трем утолщениям трубки Ио. Прodelав аналогичные расчеты, получаем для этого момента времени оценки скорости v_b , размеров M_x и высот h_b максимумов “бульб” над поверхностью планеты, которые сведены в таблицу.

Таблица

f_0 , МГц	25	20	17
Δf_{sb} , МГц	1.5	2.5	4
$(df/dt)_{sb}$, МГц/с	0.012	0.017	0.017
V_b , км/с	10	23	35
M_x , км	1200	3500	8400
h_b , тыс. км	14.2	19.5	24.7

Близкие значения этих параметров получаются и для большинства других бурь S-излучения в источниках Io-B и Io-C.

Из таблицы следует еще одно свойство динамических явлений в трубке – это изменение характерного размера “бульб” в соответствии с шириной Δf_{sb} спектральных полос S-излучения в процессе их движения вдоль трубки и рост скорости V_b с удалением от планеты.

7. Статистические характеристики спектров S-всплесков

Применение акусто-оптического спектрографа (АОС) позволило существенно продвинуться в изучении тонкой структуры спектров. При 50-кратном увеличении разрешения по времени относительно данных, приведенных на рис. 5 и рис. 6, спектральные полосы в f - t координатах приобретают вид, подобный реализации гауссова шума, однако здесь по оси ординат отложена частота излучения. Такие спектры показаны на рис. 8 и рис. 9. Плотность распределения частоты излучения S-всплесков в спектральных полосах максимальна на некоторой средней частоте f_0 –

$$p(f - f_0) \approx (1/\sigma\sqrt{2\pi}) \exp[-(f - f_0)^2/2\sigma^2],$$

где σ характеризует частотную ширину спектральной полосы:

$$2\sigma \approx \Delta f_{sb}/2.$$

Если принять гипотезу соответствия спектральных полос зонам утолщения трубки Ио, то плотность вероятности S-всплесков максимальна в максимуме поперечного сечения трубки Ио, а в минимуме S-всплески вообще не возбуждаются. Это находит свое объяснение при анализе тонкой структуры спектров.

8. Тонкая структура спектров

Спектры тонкой структуры в основном имеют сложные формы изображений. При этом относительно простые квазилинейные спектры находятся в меньшинстве. Как правило, спектры испытывают общую тенденцию к отрицательному частотному дрейфу, однако отдельные участки многих сложных спектров испытывают положительный частотный дрейф. Обычно в течение бури S-излучения, наблюдаемой с Земли, можно выделить три стадии эволюции S-бури, длительностью несколько десятков минут, различающиеся между собой сложностью спектральной картины в координатах амплитуда-частота-время.

На начальной стадии бури наблюдаются квазилинейные отрицательно дрейфующие всплески умеренной амплитуды с временем жизни до 50 мс в полосе существования около $2 \div 4$ МГц. Это соответствует традиционному представлению об S-всплесках Юпитера, примеры которых приведены на рис. 10. В начальной стадии токовые нити могут испытывать разрывы, но топология магнитного поля в зоне излучения искажена несущественно. Эта стадия соответствует генерации квазирегулярных последовательностей S-всплесков (типа “дождя”), т. е. простых линейных на f - t плоскости спектров.

Средняя стадия бури характеризуется увеличенными амплитудами всплесков и возрастанием сложности изображений индивидуальных всплесков на f - t плоскости. Такие спектры приведены на рис. 11. На второй стадии мы имеем дело с кардинальными искажениями и нестабильностью во времени структуры локальных полей, что приводит к резкому усложнению динамических спектров отдельных всплесков. В конце бури ситуация подобна начальной стадии.

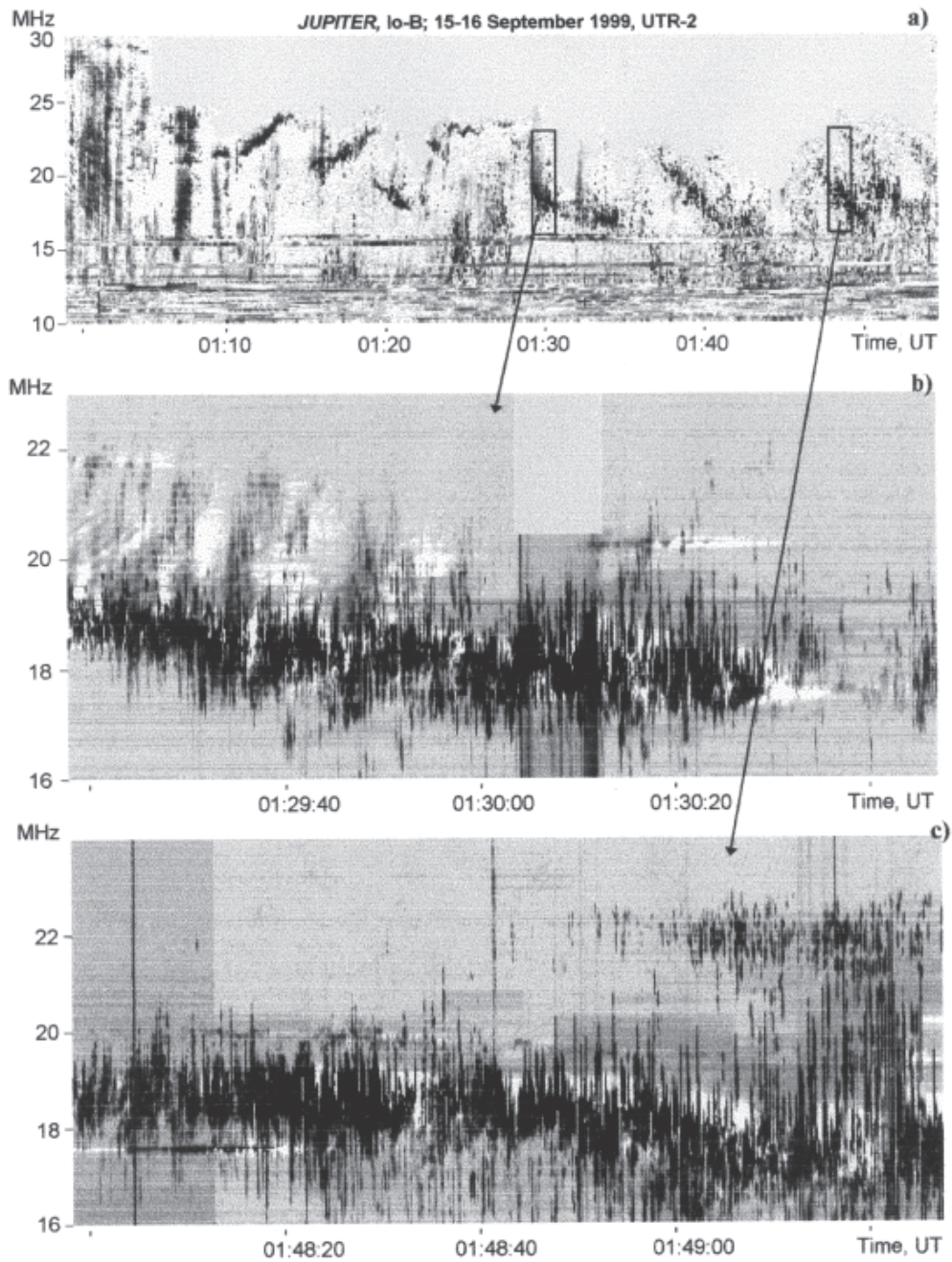


Рис. 8. Структура динамического спектра источника Io-B от 16 сентября 1999 г.:

a) интервал спектрограммы $h\nu$ анализатора со средней разрешающей способностью по $f-t$ в момент зарождения спектральных полос S-излучения; b), c) – вид спектральных полос S-всплесков (АОС), сжатых по t , при 50-ти кратном увеличении разрешения по времени

8.1. Связь тонкой структуры спектров с модуляцией толщины трубки Ио

В рамках гипотезы о модуляции диаметра трубки Ио, как это показано на рис. 7, нахо-

дит свое объяснение связь некоторых характеристик тонкой структуры эмиссии с неоднородностями трубки. Следуя рассмотренной выше модели излучателя, в которой дрейфую-

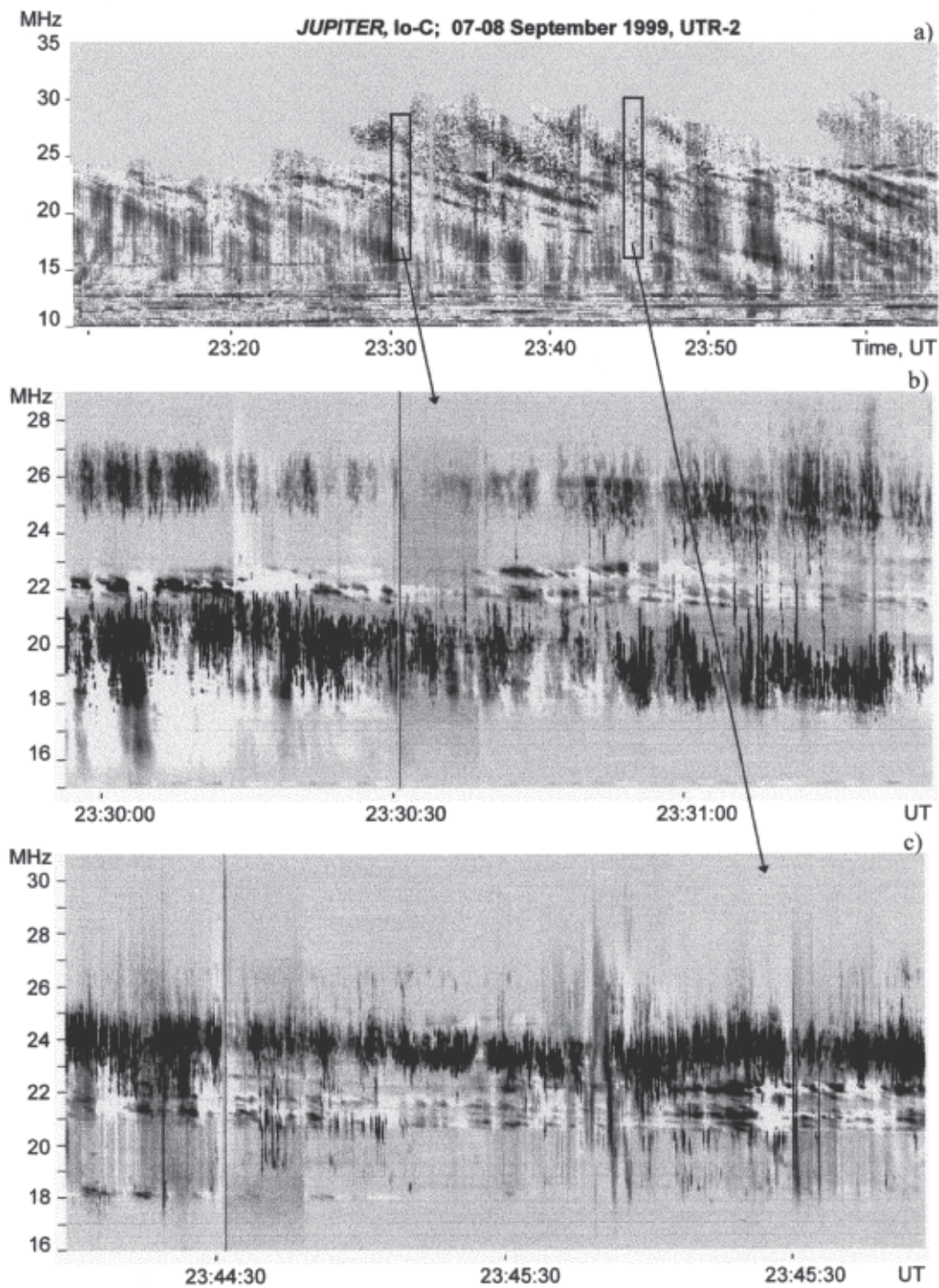


Рис. 9. Структура динамического спектра источника Io-C от 7 сентября 1999 г.:
 а) интервал спектрограммы $h\nu$ анализатора со средней разрешающей способностью по $f-t$ в момент зарождения спектральных полос S-излучения; б), в) – вид спектральных полос S-всплесков (АОС), сжатых по t , при 50-ти кратном увеличении разрешения по времени

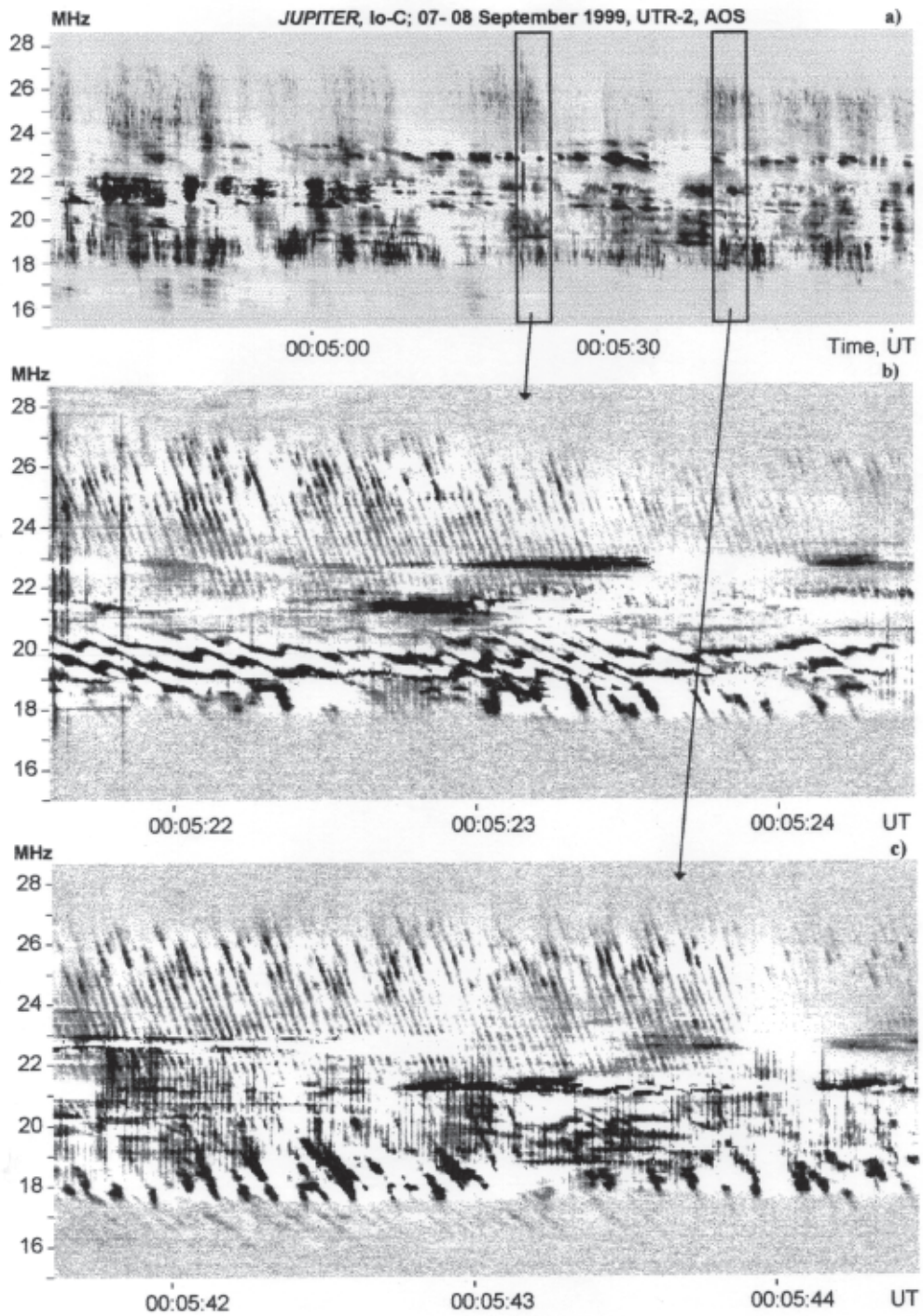


Рис. 10. Детализация спектральной полосы бури S-излучения источника Io-C 7-8 сентября 1999 г.:
 а) две полосы сжатых по t всплесков с весьма высокой частотой повторения; б) ультралинейные спектры отдельных всплесков с отрицательным дрейфом; в) комбинация линейных спектров с отрицательным и положительным частотным дрейфом

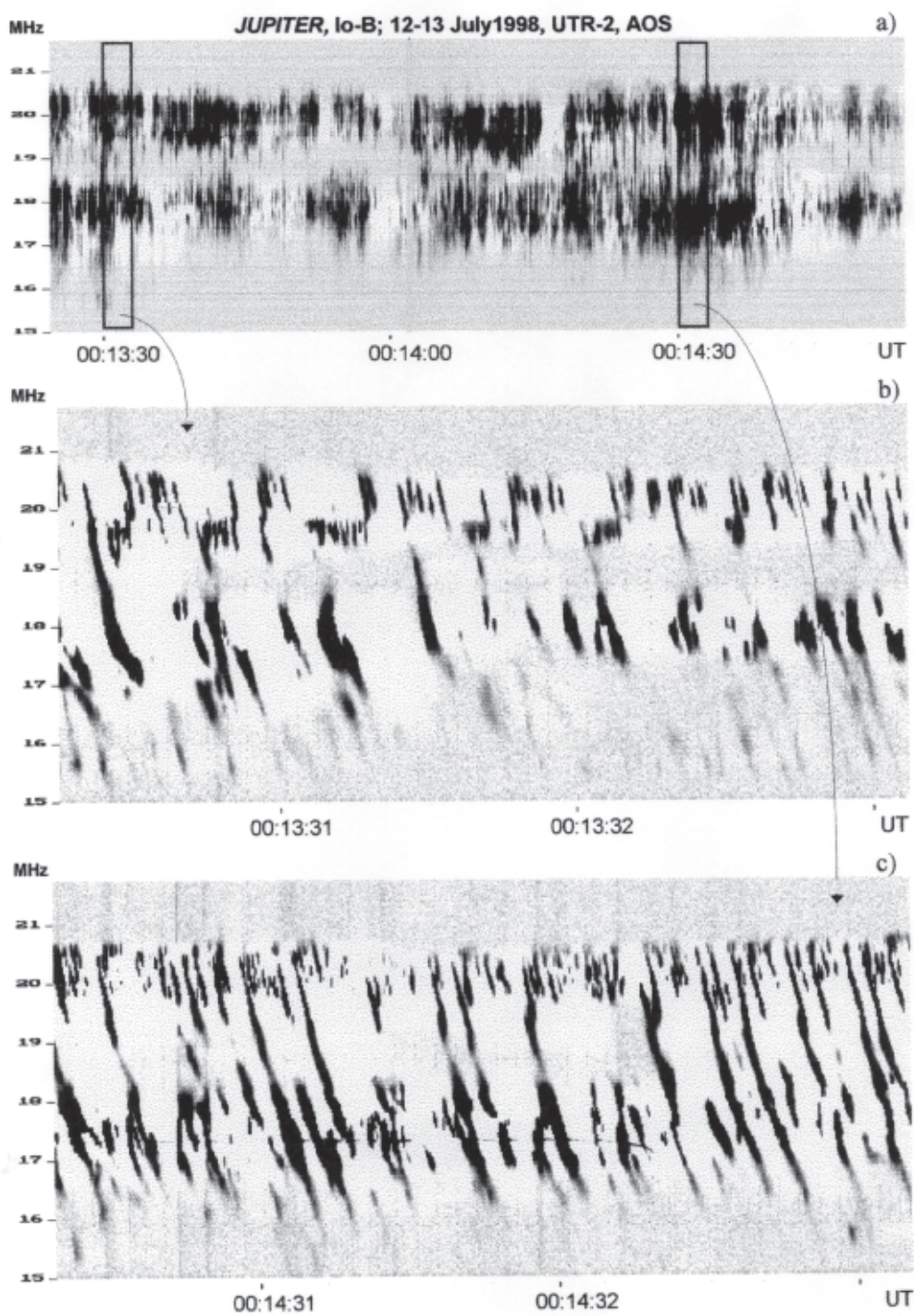


Рис. 11. Две спектральные полосы ($f_{01} \approx 17$ МГц и $f_{02} \approx 20$ МГц) весьма мощных S-всплесков средней части бури 13 июля 1998 г., которые эпизодически преодолевают полосу молчания: а) полосы сжатых по t всплесков; б), в) – индивидуальные спектры всплесков сложной структуры

щий по частоте S-всплеск образован в результате каскадного процесса разрывов смежных токовых нитей, учтем, что магнитное натяжение в токовых нитях на поверхности трубки Ио, равное

$$B_S^2/4\pi,$$

слабее в местах утолщения трубки, т. е.

$$B_S \sim 1/r_S,$$

где r_S – диаметр сечения трубки Ио. Поэтому прочность токовых нитей на поверхности трубки меньше в местах ее утолщения, где и происходят разрывы. Здесь, как правило, и локализованы элементарные излучатели S-всплесков.

Если первичный спонтанный разрыв токовой нити произошел где-то ниже максимума утолщения, то в этот момент будет наблюдаться излучение небольшой интенсивности на верхней частоте всплеска (тонкий начальный участок динамического спектра S-всплеска). Далее очаг разрывов движется в сторону утолщения трубки, мощность излучения всплеска растет и затем, при подходе к седловине, снова падает. Очевидно, каскадный процесс разрывов нитей останавливается при сужении трубки, и излучение всплеска исчезает.

8.2. Сложные спектры S-всплесков

Возможно, что появление сложных форм динамических спектров S-всплесков есть результат значительных искажений топологической структуры магнитных полей и токовых цепей в предельно возбужденной излучающей зоне трубки Ио. В периоды генерации мощных S-всплесков, вследствие возрастания силы тока трубки i_T и ее поперечной скорости v_s , трубка Ио близка к критическому состоянию, когда сравнительно небольшие возмущения ведут к лавинообразному высвобождению энергии. К таким явлениям применима концепция самоорганизующегося критического состояния, типичного для сложных систем.

Если S-всплески генерируются в соответствии с алгоритмом, описанным выше в разделе 5, т. е. они излучаются вследствие разрывов элементарных токовых нитей на поверхности трубки Ио, тогда в некоторых случаях должны наблюдаться спектры на $f-t$ плоскости, состоящие из серий ярких точек. Обычно отдельные точки на спектральных изображениях такого типа нельзя различить, потому что разрывы смежных токовых нитей сливаются в одну линию на картине спектра. Однако, когда топология полей в трубке Ио очень сильно искажена, серии ярких точек спектра становятся видимыми. Эти спектры S-всплесков мы неоднократно наблюдали. Примеры точечных спектров этого типа приведены на рис. 12.

Весьма интересен такой наблюдательный факт, связанный с процессом формирования тонкой структуры динамических спектров, как повторение самоподобных изображений всплесков на $f-t$ плоскости в течение сравнительно короткого периода времени. Типичный интервал между всплесками – порядка характерного времени жизни самого всплеска. Некоторые сложные по форме индивидуальные спектры повторяются от 3-х до 10-ти раз в течение 1 мин. Примеры таких повторяющихся спектров приведены на рис. 13. Представляет интерес ответить на вопрос: чем определяется характерное время жизни некоторой выделенной структуры замагниченной плазмы, которая ответственна за формирование спектра S-всплеска определенной формы? Возможно, что ответ кроется именно в анализе серий самоподобных изображений всплесков. Появление серии одинаковых S-всплесков на $f-t$ плоскости означает, что в зоне излучения трубки Ио сформирована квазистабильная плазменная структура, время жизни которой в несколько раз больше полной длительности одного S-всплеска. По-видимому, эволюцию отдельного S-всплеска можно представить как развитие локальной плазменной неустойчивости в трубке Ио. Иными словами, в течение интервала порядка нескольких секунд такая структура “срабатывает” несколько раз, генерируя самоподобные всплески, и разрушается. В последующие минуты близкие ус-

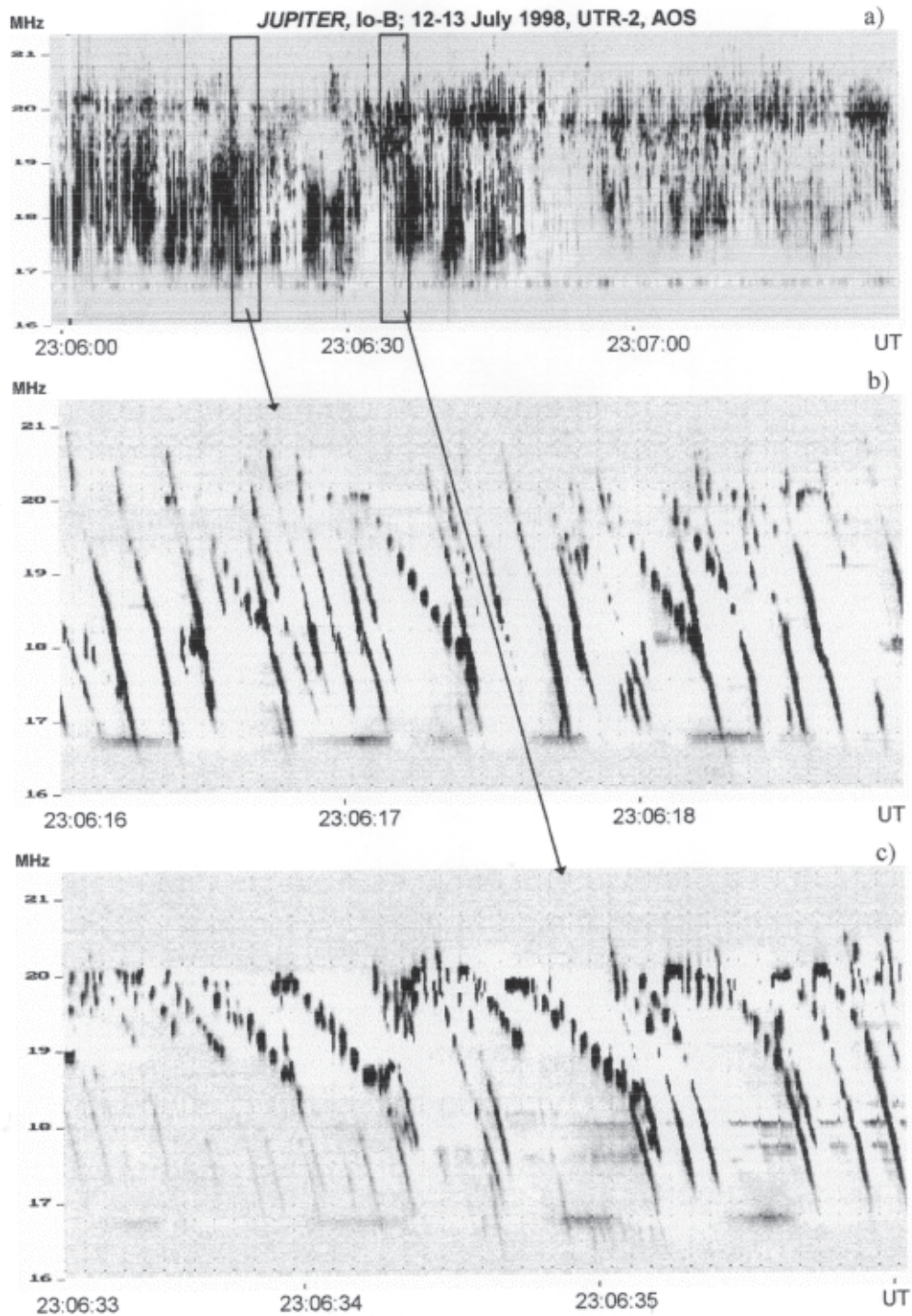


Рис. 12. Детализация спектральной полосы бури S-излучения источника Io-B 12-13 июля 1998 г.:
a) фрагмент полосы сжатых по t S-всплесков; b), c) – индивидуальные спектры всплесков с точечной структурой (AOC)

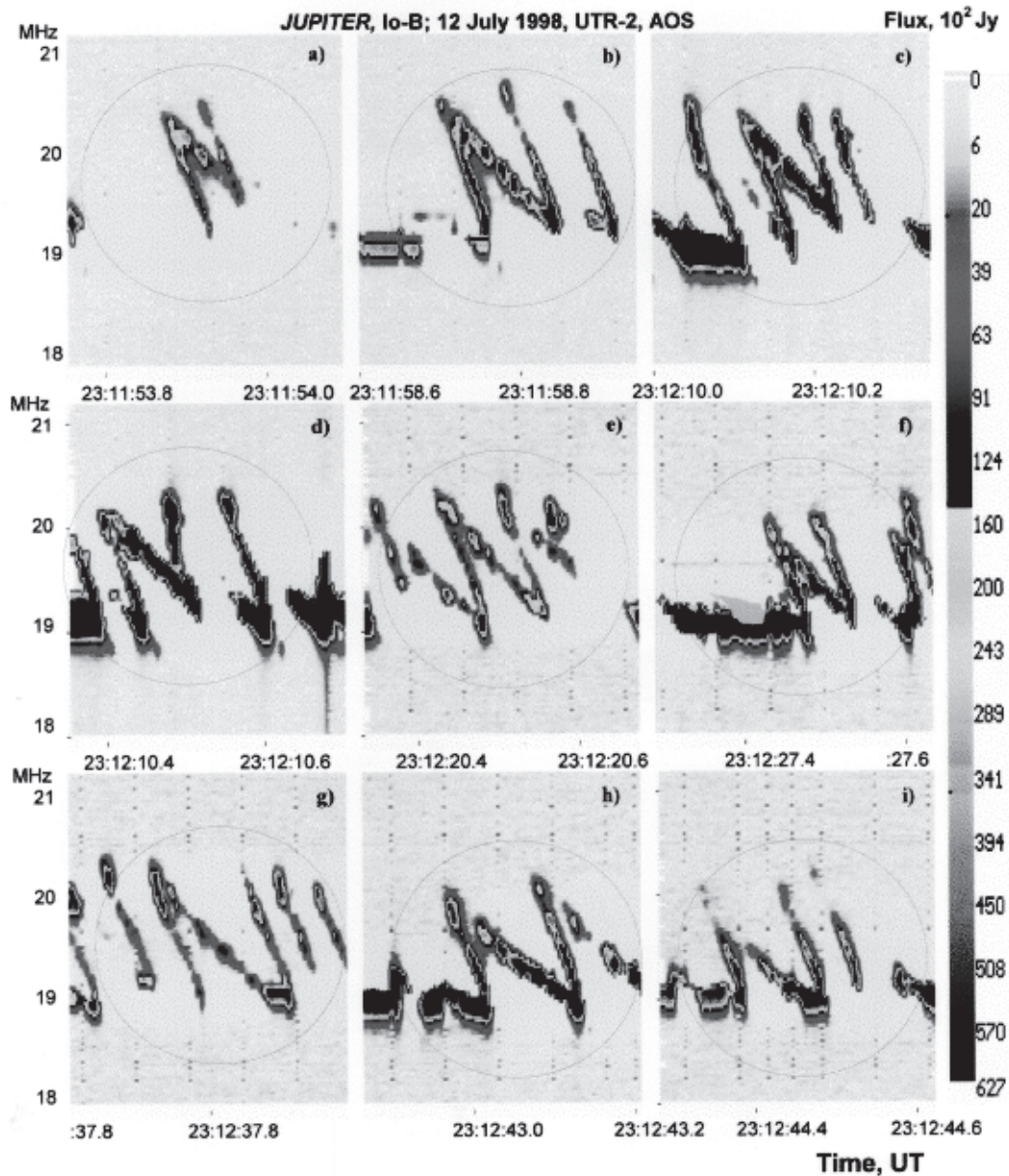


Рис. 13. Серии спектральных изображений всплесков типа буквы N, которые могут иметь различный масштаб в $f-t$ координатах:
a), b), c), ..., i) – совпадающие по форме девять изображений всплесков, которые следуют с интервалом в несколько секунд и затем исчезают

ловия в зоне излучения могут быть воспроизведены снова, что приводит к возникновению новой серии подобных по форме всплесков. Возможно, что в данном случае мы имеем дело с явлением локальных квазирегуляр-

ных пульсаций параметров плазмы и магнитного поля. Нужно отметить также, что одинаковые формы самоподобных спектров S-всплесков встречаются в спектральных записях различных лет.

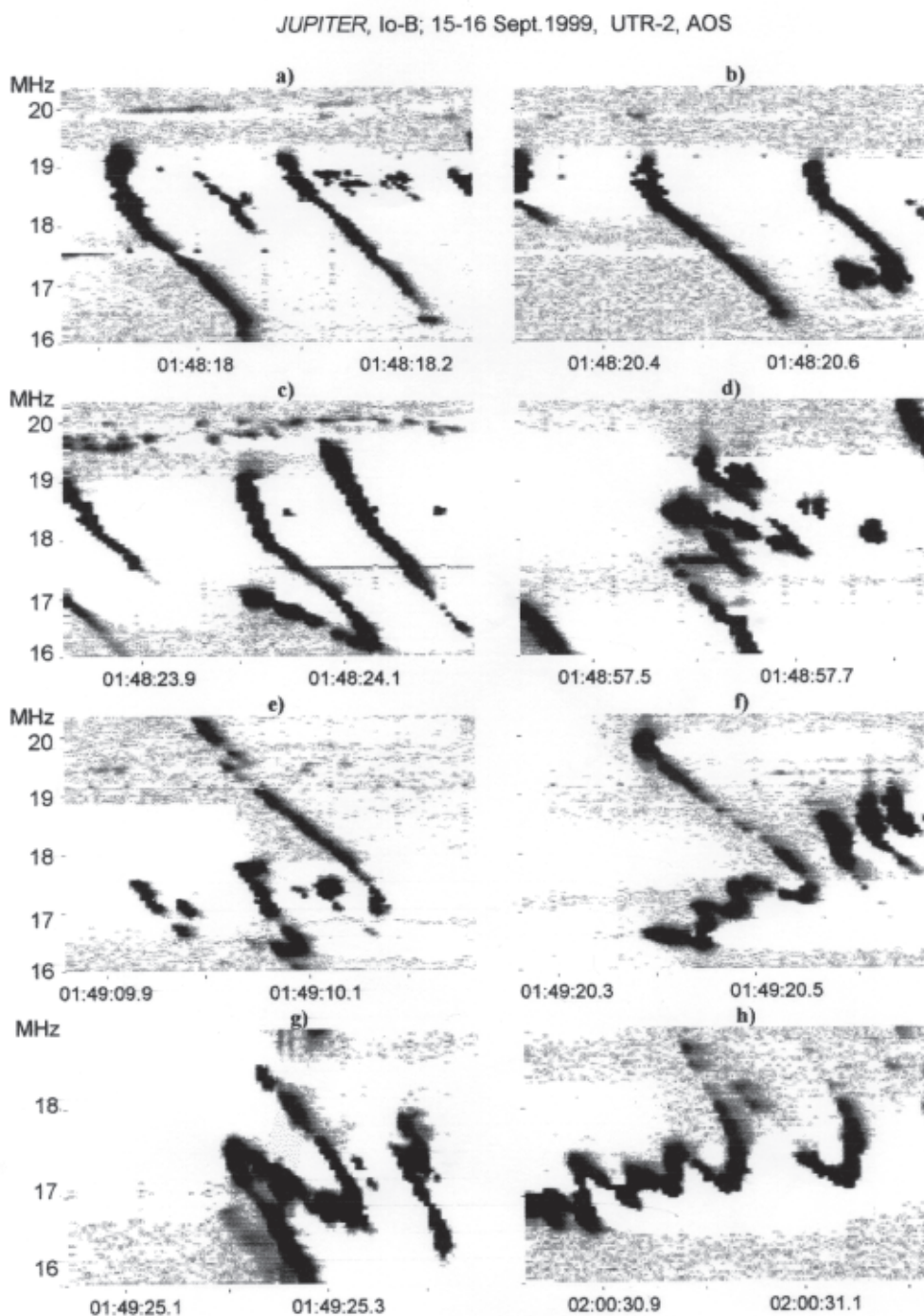


Рис. 14. Повторяющиеся спектральные изображения сложных S-всплесков: a), b), c),..., h) – весьма близкие по форме изображения всплесков, которые усложняют свою форму за время жизни серии

Характерный частотный масштаб и амплитуда спектров S-всплесков на $f-t$ плоскости обусловлены геометрическим размером излучающей зоны трубки Ио. Это может свиде-

тельствовать о прямой зависимости высвобождаемой энергии от размеров зоны излучения. Учитывая, что время жизни всплеска пропорционально частотной полосе его существова-

ния, можно прийти к выводу, что долгоживущая неустойчивость с постоянным инкрементом роста обеспечивает более высокую интенсивность излучения. Когда S-всплески достигают предельно высокой плотности потока, наблюдается “пробой” зон молчания между соседними спектральными полосами, так что два смежных всплеска сливаются. На рис. 11 показан фрагмент динамического спектра с двумя полосами на частотах 17 и 20 МГц. Частотный диапазон слившихся всплесков достигает 6 МГц. Возможно, что здесь движущийся очаг разрывов токовых нитей на поверхности трубки Ио преодолевает седловину между “бульбами”, т. е. основными зонами генерации S-всплесков (см. рис. 7).

Более сложные формы повторяющихся динамических спектров отдельных S-всплесков приведены на рис. 14. Спектры такого рода трудно объяснимы с точки зрения причинно-следственных связей, т. к. излучение возникает в какой-то момент времени независимо на двух значительно разнесенных частотах, и затем спектр плавно сливается в одной точке на f - t плоскости.

При анализе спектров повторяющихся всплесков возникает вопрос: почему информация выдается порциями f - t изображений, которые “проигрываются” несколько раз, подобно закольцованной магнитозаписи, затем разрушаются и исчезают. Возможно, что повторяющиеся спектры S-всплесков есть результат вращения длинных ($L \gg \lambda$) искривленных нитевидных антенн с частотно-зависимым конусом излучения. Они появляются в результате значительных искажений топологической структуры магнитных полей и токовых цепей в предельно возбужденной излучающей зоне трубки Ио. Медленное вращение широкополосного остронаправленного излучателя относительно наблюдателя дает повторяющиеся изображения спектров, затем плазменное образование, высвечиваясь, разрушается.

Литература

1. B. F. Burke, and K. L. Franklin. *J. Geophys. Res.* 1955, **60**, pp. 213-217.
2. E. K. Bigg. *Nature*. 1964, **203**, pp. 1008-1010.
3. E. K. Bigg. *Planet. Space Sci.* 1966, **14**, No. 8, pp. 741-758.
4. B. P. Ryabov, P. Zarka, H. O. Rucker, V. B. Ryabov, and M. Y. Boudjada. In *Planetary Radio Emission III*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer and A. Lecacheaux. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1997, pp. 65-89.
5. B. P. Ryabov, P. Zarka, H. O. Rucker, V. B. Ryabov, and M. Y. Boudjada. *Radiophys. and Radioastron.* 1997, **2**, No. 4, pp. 402-418.
6. T. D. Carr, and F. Reyes. 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. 145.
7. J. K. Alexander, and M. D. Desch. *J. Geophys. Res.* 1984, **89**, pp. 2689-2697.
8. T. D. Carr, M. D. Desch, and J. K. Alexander. In *Physics of the Jovian Magnetosphere*, ed. A. J. Dessler. Cambridge University Press, New York, 1983, pp. 226-284.
9. M. D. Desch. *Nature*. 1978, **272**, No. 5651, pp. 339-340.
10. M. D. Desch, R. S. Flagg, and J. May. *Nature*. 1978, **272**, pp. 38-42.
11. G. A. Dulk. *Astrophys. J.* 1970, **159**, No. 2, pp. 671-684.
12. G. A. Dulk, A. Lecacheux, and Y. Leblanc. *Astron. Astrophys.* 1992, **253**, pp. 292-306.
13. G. R. A. Ellis. *Nature*. 1975, **253**, No. 5491, pp. 415-417.
14. G. R. A. Ellis. *An Atlas of selected spectra of the Jupiter S-bursts*. Univ. of Tasmania, Hobart, Tasmania, Australia, 1979, 197 p.
15. G. R. A. Ellis. *Austral. J. Phys.* 1982, **35**, pp. 165-175.
16. R. S. Flagg, and M. D. Desch. *J. Geophys. Res.* 1980, **84**, pp. 4238-4244.
17. R. S. Flagg, W. B. Greenman, F. Reyes, T. D. Carr. *A Catalog of High Resolution Jovian Decametric Radio Noise Burst Spectra*. Dept. of Astronomy University of Florida, Gainesville, Florida 32611, 1991, **1**, 199 p.
18. Y. Leblanc, F. Genova, and J. de la Noe. *Astron. Astrophys.* 1980, **86**, pp. 342-348.
19. Y. Leblanc, M. G. Aubier, C. Rosolen, F. Genova, and J. de la Noe. *Astron. Astrophys.* 1980, **86**, pp. 349-354.
20. Y. Leblanc, and F. Genova. *J. Geophys. Res.* 1981, **86**, No. 10, pp. 8564-8568.
21. J. J. Riihimaa. *Astrophys. and Space Sci.* 1977, **51**, No. 2, pp. 363-383.
22. J. J. Riihimaa. *Earth, Moon and Planets.* 1991, **53**, pp. 157-182.
23. J. J. Riihimaa. *Wide-range high-resolution S-bursts spectra of Jupiter*. Univ. of Oulu, Finland, 1992.

24. H. O. Rucker, and V. Mostetschnig. In *Planetary Radio Emission II*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and B. M. Pedersen. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1988, pp. 87-93.
25. H. O. Rucker, V. Mostetschnig, H. P. Ladreiter, and G. K. F. Rabl. In *Planetary Radio Emission III*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and M. L. Kaiser. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1992, pp. 115-124.
26. J. W. Warwick, J. B. Pearce, A. C. Riddle, J. K. Alexander, M. D. Desch, M. L. Kaiser, J. R. Thieman, T. D. Carr, S. Gulkis, A. Boischof, C. C. Harvey, and B. M. Pedersen. *Science*. 1979, **204**, No. 4396, pp. 995-998.
27. A. J. Willes, D. B. Melrose, and P. A. Robinson. *J. Geophys. Res.* 1994, **99**, No. A11, pp. 21203-21211.
28. B. P. Ryabov, A. V. Arkhipov, and V. A. Shevchenko. *Astron. Vestnik*. 1985, **19**, No. 4, pp. 296-318 (in Russian).
29. B. P. Ryabov. *Astron. Vestnik*, 1986, **20**, No. 1, pp. 20-34 (in Russian).
30. B. P. Ryabov, and N. N. Gerasimova. *Sporadic radio emission of Jupiter at decameter wavelength*. Kiev, Naukova Dumka, 1990, 237 pp. (in Russian).
31. B. P. Ryabov. *Astron. Vestnik*. 1990, **24**, No. 2, pp. 103-118 (in Russian).
32. B. P. Ryabov. *Astron. Vestnik*. 1990, **24**, No. 3, pp. 221-231 (in Russian).
33. S. Ya. Braude, A. V. Megn, B. P. Ryabov, N. K. Sharykin and I. N. Zhouck. *Astrophys. and Space Sci.* 1978, **54**, No. 1, pp.3-36.
34. B. P. Ryabov. In *Planetary Radio Emission III*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and M. L. Kaiser. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1992, pp.125-144.
35. B. P. Ryabov. *J. Geophys. Res.* 1994, **99**, No. E4, pp. 8441-8449.
36. J. E. P. Connery, M. H. Acuna, and N. F. Ness. *J. Geophys. Res.* 1981, **86**, No. A10, pp. 8370-8374.
37. J. E. P. Connery. In *Planetary Radio Emission III*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and M. L. Kaiser. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1992, pp. 13-33.
38. J. E. P. Connery. *J. Geophys. Res.* 1993, **98**, pp. 18659-18679.
39. P. Zarka, B. P. Ryabov, M. Y. Boudjada, L. Denis. *International Symp.*, Graz, Austria, August 8 - 12, 1994.
40. B. P. Ryabov, V. B. Ryabov, H. O. Rucker, P. Zarka, M. Y. Boudjada. *International Workshop "The Solar Wind-Magnetosphere System 2"*, Graz, Austria, September 1995.
41. B. P. Ryabov, P. Zarka, H. O. Rucker, V. B. Ryabov, and M. Y. Boudjada. *4th International Workshop on Radio Emission from Planetary Magnetospheres*, Graz, Austria, September 9-11, 1996.
42. L. N. Litvinenko, B. P. Ryabov, V. B. Ryabov, V. A. Shevchenko, O. V. Arkhipov, P. Zarka, L. Denis, A. Gerbault, H. O. Rucker, and M. Y. Boudjada. *4th International Workshop on Radio Emission from Planetary Magnetospheres*, Graz, Austria, September 9-11, 1996.
43. P. Zarka, T. Farges, B. P. Ryabov, M. Abada-Simon. *J. Geophys. Res. Letters*. 1996, **23**, No. 2, pp.125-128.
44. P. Zarka, B. P. Ryabov, V. B. Ryabov, et. al. *EGS Symposium PS-5.01: "Planetary Magnetospheres and Ionospheres"*, the Hague, Netherlands, May 1996.
45. P. Zarka, B. P. Ryabov, V. B. Ryabov, and H. O. Rucker. *Invited paper at EGS Symposium ST15/PS7, "Solar System Radiophysics and Related Topics"*, the Hague, Netherlands, May 1996.
46. P. Zarka, J. Queinnee, B. P. Ryabov, V. B. Ryabov, V. A. Shevchenko, O. V. Arkhipov, H. O. Rucker, L. Denis, A. Gerbault, P. Dierich, and C. Rosolen. In *Planetary Radio Emission IV*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer and A. Lecacheaux. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1997, pp. 101-128.
47. P. Zarka, B. P. Ryabov, V. B. Ryabov, R. Prange, M. Abada-Simon, T. Farges, and L. Denis. In *Planetary Radio Emission IV*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer and A. Lecacheaux. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1997, pp. 101-128.
48. P. Zarka, B. P. Ryabov, V. B. Ryabov, R. Prange, and L. Denis. *Western Pacific Geophysics Meeting*. Sess. 21B-07, Taiwan, 1998, 26 p.
49. B. P. Ryabov, P. Zarka, H. O. Rucker, V. B. Ryabov, V. A. Shevchenko, O. V. Arkhipov, M. Y. Boudjada, L. Denis, A. Gerbault, and P. Kleewein. *Wide Band Detailed Spectra of Jovian Io-related Radio Emissions. Radiophysics and Radioastronomy (to be published)*.
50. J. L. Green. *Radio Sci.* 1984, **19**, No. 2, pp. 556-570.
51. P. Zarka. In *Planetary Radio Emissions II*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and B. M. Pedersen. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 1988, pp. 327-342.
52. M. L. Goldstein, and C. K. Goertz. In *Physics of the Jovian Magnetosphere*, ed. by A. J. Dessler. Cambridge Univ. Press, New York, 1983, p. 317.
53. V. V. Zaitsev, E. Ya. Zlotnik, and V. E. Shaposhnikov. *Pis'ma Astron. Zh.* 1985, **11**, p. 208.
54. A. G. Boev, and M. Ya. Luk'yanov. *Astron. Zh.* 1991, **63**, pp. 853-862.
55. G. V. Litvinenko, H. O. Rucker, V. V. Vinogradov, B. P. Ryabov, and V. E. Shaposhnikov. *Preprint No. 114. Institut fur Weltraumforschung*, Graz, Austria Dec. 9, 1999.
56. G. V. Litvinenko, H. O. Rucker, V. V. Vinogradov, B. P. Ryabov, and V. E. Shaposhnikov. *Radio Sci.* accepted in press.
57. A. J. Dessler, and T. W. Hill. *Astrophys. J.* 1979, **227**, No. 2, pp. 664-675.

Jovian Decametric Emission. Multiscale Dynamic Spectra

B. P. Ryabov

The new Jupiter observations of 1998-2000 years were carried out in frequency range of 10÷40 MHz with UTR-2 array, the acousto-optical spectrograph from Nancay (France), and sweeping *hp* spectrum analyzer. We have obtained the overall time S-burst storm dynamic spectra as well as fine structured, highest sensitivity dynamic spectra of S-bursts in the 10 ÷ 30 MHz continuous frequency range. The spectrum details of five characteristic *f-t* scale from hours to milliseconds were investigated. The process formation of the asymmetric S-emission cone and some physical aspects joined with com-

plicated spectral images were considered. Many complicated S-bursts demonstrate the features of apparent self-similarity with different *f-t* scale.

The long series of S-bursts are concentrated within spectral sub-bands of 1.5 to 5 MHz bandwidth, whose central frequencies are separated in average by about 3.5 MHz. The sub-bands are negative or positive drifting with a rate about 17 kHz/s. We assume that the spectral sub-bands correspond to Io-tube “bulb” inhomogeneities where the S-burst emitters are probably located. On the basis of spectrogram obtained we evaluate the bulb sizes, their location and velocities in the radiation zones. The Io tube shape is quite compatible with some characteristics of S-bursts fine structure, and radiation source model [34, 35] early proposed.