

УДК 523.45

А. В. Архипов

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины
61002 Харьков, ул. Краснознаменная 4

О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: тор Ио

Модуляционные дорожки декаметрового радиоизлучения Юпитера формируются рассеянием излучения на неоднородностях магнитосферы этой планеты, вытянутых вдоль магнитного поля. Численный алгоритм локализации магнитосферных неоднородностей по частотному дрейфу модуляционных дорожек использован для изучения плазменного тора Ио.

ПРО МОДУЛЯЦІЙНІ ДОРІЖКИ У СПЕКТРІ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА: ТОР ІО, Архипов О. В. — Модуляційні доріжки декаметрового радіовипромінювання Юпітера формуються розсіюванням на неоднорідностях магнітосфери цієї планети, витягнутих уздовж магнітного поля. Чисельний алгоритм локалізації магнітосферних неоднорідностей за частотним дрейфом модуляційних доріжок застосовано для вивчення плазмового тору Іо.

ON MODULATION LANES IN SPECTRA OF JOVIAN DECAMETRIC RADIO EMISSION: IO TORUS, by Arkhipov A. V. — Modulation lanes in spectra of Jovian decametric radio emission are formed by radiation scattering on field-aligned inhomogeneities in the magnetosphere of the planet. Numerical algorithm for localization of magnetospheric inhomogeneities by the frequency drift of modulation lanes is used for the study of Io plasma torus.

ВВЕДЕНИЕ

Выбросы вулканов Ио формируют тор плазмы, простирающийся вдоль орбиты этого спутника Юпитера. Это уникальное образование было открыто в 1974 г., и с тех пор интенсивно изучается как средствами наземной астрономии, так и с помощью космических аппаратов [4]. Однако оптические наблюдения с Земли не позволяют исследовать тор с разрешением лучше 1000 км, а измерения космических аппаратов эпизодичны и не дают возможности вести длительный мониторинг состояния плазмы в торе. Поэтому актуальны исследования тора средствами наземной радиоастрономии, которая позволяет регистрировать эффекты рассеяния тором излучения компактных (менее 30 км [2]) источников декаметрового радиоизлучения Юпитера (ДИЮ).

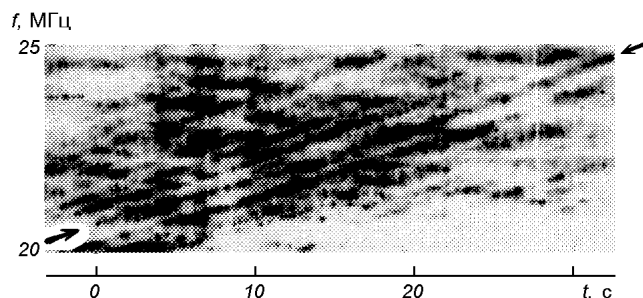


Рис. 1. Модуляционные дорожки тора Ио (одна из них указана стрелками) на фоне радиобури Ио-В 08.09.1987 [18]

В этой связи большой интерес представляют модуляционные дорожки — светлые и темные полосы в динамическом спектре ДИЮ, дрейфующие по частоте со скоростями порядка 100 кГц/с (рис. 1) [10, 18]. К. Имаи и др. убедительно показали, что большинство модуляционных дорожек возникает в результате рассеяния ДИЮ на неоднородностях плазменного тора Ио [11—13]. Эти неоднородности вытянуты вдоль силовых линий магнитного поля Юпитера и вращаются вместе с ним на фоне активной силовой линии, вдоль которой генерируется ДИЮ на частотах, близких к локальным циклотронным частотам электронов. До сих пор модуляционные дорожки использовались только для локализации и оценки размера источников ДИЮ [2, 13]. При этом тор Ио представляется в виде тонкого фазового экрана, что является очевидным упрощением.

Здесь предпринята попытка использовать модуляционные дорожки для получения информации о торе Ио.

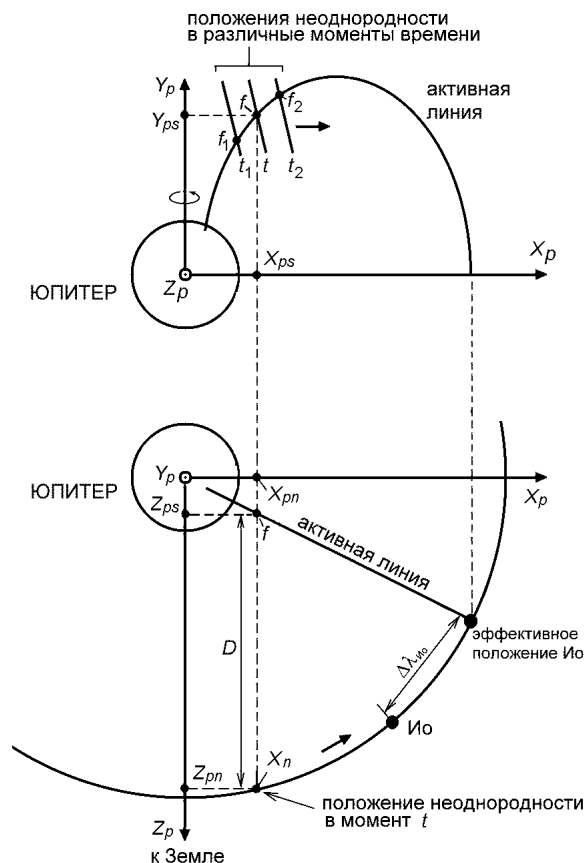
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С помощью модуляционных дорожек можно изучать расположение магнитосферных неоднородностей (МН) в пространстве и судить о структуре тора Ио.

Место расположения МН на прямой радиисточник — Земля может быть вычислено по скорости частотного дрейфа модуляционной дорожки. Суть этого алгоритма (DL) заключается в подборе такого расстояния D радиисточник — МН, при котором расчетная скорость дрейфа дорожки совпадает с наблюдаемой. При этом скорость дрейфа вычисляется по заданной модели магнитного поля (VIP4 [9]) путем проектирования на картинную плоскость силовых линий, соответствующих источнику ДИЮ и МН (рис. 2). Для двух моментов времени ($t_1 = t - \Delta t/2$, $t_2 = t + \Delta t/2$) численно находятся точки проекции МН на активную силовую линию, где генерируется ДИЮ соответственно на частотах f_1 и f_2 , которые принято считать близкими к локальным циклотронным частотам электронов [2, 11—13]. Скорость дрейфа дорожки находится как отношение сдвиги этой частоты $\Delta f = f_2 - f_1$ к малому интервалу времени $\Delta t = t_2 - t_1$ (т. е. $df/dt \approx \Delta f/\Delta t$).

Этим способом для каждой модуляционной дорожки можно вычислить координаты точки, где излучение пересекает МН: $X_p = X_{ps}$, $Y_p = Y_{ps}$ в картинной плоскости и $Z_p = Z_{ps} + D$ на луче зрения, где X_{ps} , Y_{ps} , Z_{ps} — координаты источника ДИЮ на данной частоте f . При этом центр системы координат помещен в центр Юпитера, ось Z_p направлена к Земле, ось X_p лежит в плоскости экватора Юпитера и направлена в сторону вращения планеты, а ось Y_p ориентирована перпендикулярно, в северное полушарие планеты. Переход к системе координат планетарного магнитного поля осуществим с помощью матрицы поворота, описанной в работе [2]. Там же рассмотрен вопрос о локализации источников ДИЮ.

Рис. 2. Схема формирования модуляционных дорожек тора Ио и использованные обозначения (вверху — вид с Земли, внизу — проекция на экваториальную плоскость Юпитера)



Наиболее часто модуляционные дорожки тора наблюдаются на фоне радиобурь, четко коррелирующих с положением Ио на орбите относительно наблюдателя [18]. В этом случае радиоизлучение можно связать с магнитной силовой линией, пересекающей эффективное положение Ио (рис. 2). Разность долгот эффективного и истинного положений спутника $\Delta\lambda_{Io}$ поддается оценке методом модуляционных дорожек (алгоритм OPER [2]), так как наиболее часто дорожки должны формироваться в окрестностях орбиты Ио — источника плазмы тора. Определив таким путем координаты радиоисточника X_{ps} , Y_{ps} , Z_{ps} и расстояние от него до МН D , можно локализовать и эффективный центр области формирования дорожки.

Такого рода исследования весьма актуальны, поскольку распределение МН в торе Ио до сих пор не изучалось. С прикладной точки зрения важно оценить возможность мониторинга тора методом модуляционных дорожек.

РАДИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ТОРА ИО

Радиальную структуру тора Ио характеризует распределение модуляционных дорожек по параметру D .

К сожалению, известно мало изображений качественных спектров ДИЮ с модуляционными дорожками. Лучшие изображения дорожек находятся в атласе Й. Й. Риихимаа [18]. Там представлены динамические спектры радиобурь Ио-В, записанных в 1987—1988 гг. на акустооптическом спектроанализаторе Университета Оулу (Финляндия). Регистрировалось излучение только с правосторонней поляризацией, которое генерируется в северной полярной области магнитосферы Юпитера. Спектры записаны на

интервалах времени по 2.5 мин и охватывают частоты 20—30 МГц с оптимальным разрешением (0.15 с, 70 кГц) для изучения модуляционных дорожек (рис. 1). На спектрах № 1—5 (08.09.1987) и № 17—22 (09.10.1987) из атласа [18] были измерены положительные скорости дрейфа df/dt 132 дорожек в диапазоне 20—25 МГц.

Чтобы для каждой дорожки вычислить параметр D с помощью алгоритма DL (см. выше), необходимо знать положение радиоисточника. Принято считать [2, 13], что в случае радиобурь, коррелирующих с движением Ио (в нашем случае бури Ио-В), радиоисточником является область магнитосферы Юпитера, возмущенная Ио и вытянутая вдоль активной магнитной линии (рис. 2). Эта линия пересекает орбиту Ио в точке с несколько меньшей орбитальной долготой, чем у спутника. По-видимому, указанное смещение возникает из-за запаздывания влияния Ио на полярную область магнитосферы, которая успевает повернуться вместе с Юпитером на так называемый угол опережения $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$. Оценить этот угол можно по наивероятнейшему дрейфу дорожек $(df/dt)_m$. Чаще всего дорожки должны формироваться в области максимальной концентрации электронов, которая расположена на магнитной оболочке орбиты Ио — источника плазмы тора [4]. Задав таким образом D , можно подобрать такое $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$, при котором расчетный дрейф дорожки (согласно алгоритму DL) совпадает с наиболее часто наблюдаемым. В случае радиобури 08.09.1987 2:10.8 UT имеем $(df/dt)_m = 130 \pm 5$ кГц/с на средней частоте $\langle f \rangle = 22.45$ МГц, откуда следует $\Delta\lambda_{\text{Ио}} = 44 \pm 4^\circ$. Аналогично для бури 09.10.1987 22:30.5 UT имеем $(df/dt)_m = 123 \pm 5$ кГц/с, $\langle f \rangle = 22.71$ МГц и $\Delta\lambda_{\text{Ио}} = 36 \pm 4^\circ$.

Найденные значения $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ были использованы при вычислении значения D каждой измеренной модуляционной дорожки. Средняя квадратичная ошибка δ_D параметра D была оценена путем аналогичной обработки десятков измерений df/dt , выполненных на различных участках одной и той же дорожки (для каждой радиобури выбиралась своя дорожка). Результаты таких измерений представлены в таблице, где n — число измеренных модуляционных дорожек, $\langle D \rangle$ — среднее значение параметра D , определенное по всем n дорожкам, σ_D — стандартное отклонение дорожек по параметру D , δ_D — средняя квадратичная ошибка оценки D , $\Delta D = 2(\sigma_D^2 - \delta_D^2)^{1/2}$ — характерная толщина слоя, формирующего дорожки.

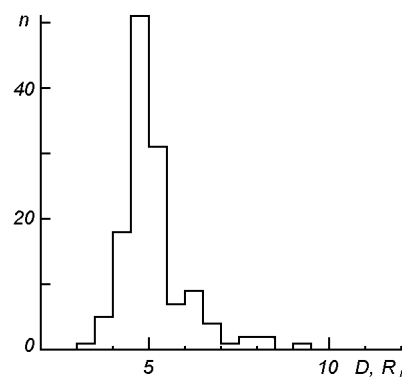
Полученные оценки свидетельствуют о том, что дорожки формируются в слое плазмы толщиной $\Delta D \sim R_J$. Это соответствует характерной толщине горячего тора Ио по результатам спектроскопии и прямым измерениям концентрации электронов [4]. Найденное значение $\langle D \rangle$ оказывается несколько меньше радиуса орбиты Ио ($5.88R_J$) из-за кривизны силовых линий и смещения радиоисточника в сторону наблюдателя относительно центра Юпитера.

Гистограмма всех оценок D показана на рис. 3. Отсюда следует, что хотя большинство оценок попадает в узкий пик, соответствующий тору Ио ($4.5 < D/R_J < 7$), дорожки формируются и на дистанциях $8 < D/R_J < 10$, т. е.

Параметры распределения неоднородностей тора Ио, формирующих модуляционные дорожки, по лучу зрения

Дата, 1987	UT	Спектры [5]	n	$\langle D \rangle, R_J$	σ_D, R_J	δ_D, R_J	$\Delta D, R_J$
8 сентября	2 ^h 06 ^m —2 ^h 15.5 ^m	1—5	86	5.16	1.05	0.40	1.94
9 октября	22 ^h 17.5 ^m —22 ^h 43.5 ^m	17—22	46	5.01	0.45	0.28	0.70

Рис. 3. Распределение модуляционных дорожек по расстоянию D их формирования от радиисточника



в окрестностях орбиты Европы (радиус $9.47R_J$). Этот результат интересен в связи с недавним обнаружением вокруг орбиты Европы обширного тора из продуктов испарения льдов спутника [16, 17].

АЗИМУТАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ ТОРА ИО

Тор Ио коротитрует с магнитным полем Юпитера. Он как фазовый экран движется перед радиисточником. Это позволяет исследовать азимутальные и временные вариации электронной концентрации в торе по изменению потока радиоизлучения на Земле. Такие изменения происходят с различными шкалами времени.

Мелкомасштабная модуляция. Модуляционные дорожки — это наиболее быстрые вариации потока ДИЮ, вызванные распространением излучения в торе Ио (рис. 1). Они следуют по частоте с характерным периодом $P_f = 310 \pm 32$ кГц (определено по соответствующему пику в среднем спектре Фурье, построенном для функции потока ДИЮ от его частоты по спектрам № 5 и № 17 из [18]). Оценка P_f позволяет найти характерный период следования дорожек по времени: $P_t = P_f / (df/dt) = 2.5 \pm 0.3$ с. Это соответствует видимому расстоянию между магнитосферными неоднородностями $d = 2\pi DP_f \sin \alpha / T = 158 \pm 22$ км, где $\alpha = 81.9 \pm 0.3^\circ$ — угол между проекцией неоднородности на картинную плоскость и экваториальной плоскостью Юпитера; $T = 35729.71$ с — период вращения Юпитера вокруг оси; $D = (5.1 \pm 0.3)R_J = 3.64 \cdot 10^5$ км согласно таблице. При этом в ошибке D учтены погрешность оценки $\Delta \lambda_{\text{Ио}} \pm 4^\circ$ и возможная неточность модели магнитного поля ($\sim 0.13R_J$), которая оценена как дисперсия оценок D , вычисленных по разным магнитным моделям (VIP4, O₄GSFC, O₆GSFC [9]).

Полученная оценка видимого поперечника неоднородностей магнитосферы $d = 158 \pm 22$ км близка к диаметру первой зоны Френеля $D_f = 2(\lambda D)^{1/2} = 139 \pm 4$ км, где $\lambda = 0.0133$ км — длина волны ДИЮ при $f = 22.5$ МГц. Следовательно, модуляционные дорожки формируются магнитосферными неоднородностями с поперечниками френелевского масштаба (в направлении, перпендикулярном к магнитному полю). Это свидетельствует об интерференционной природе модуляционных дорожек.

Локальная флуктуация δN_e электронной концентрации в торе Ио сдвигает фазу ДИЮ на величину $\delta \varphi$. Чтобы такое изменение проявилось в виде модуляционной дорожки, первая зона Френеля ДИЮ в области тора Ио должна быть существенно деформированной. Это достигается при $\delta \varphi \sim 1$ рад (так как радиус зоны Френеля определяется изменением фазы ДИЮ на π). Полный набег фазы ДИЮ в торе составляет $\Delta \varphi = 2\pi(1 - n)\Delta D/\lambda$, где n — показатель преломления тора. На орбите Ио циклотрон-

ная частота электронов ($f_c \sim 0.06$ МГц) и плазменная частота ($f_p \sim 0.3$ МГц при $N_e \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ [4]) много меньше частоты наблюдаемого ДИЮ ($f \approx \approx 22.5$ МГц). Поэтому показатель преломления тора можно вычислять в высокочастотном приближении: $n \approx 1 - f_p^2/(2f^2)$ [3, С. 124], где $f_p^2 = \kappa N_e$; $\kappa = 8.06 \cdot 10^{-5} \text{ МГц}^2 \text{ см}^3$, $N_e \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ [4]. Тогда средний набег фазы ДИЮ в торе составляет

$$\Delta\varphi \approx \pi\kappa N_e \Delta D / (\lambda f^2) \sim 3000 \text{ рад.} \quad (1)$$

Соответственно характерная вариация фазы составляет $\delta\varphi \approx \approx \pi(\kappa\delta N_e/f^2)\Delta D/\lambda \sim 1$ рад. Отсюда следует: $\delta\varphi/\Delta\varphi \approx \delta N_e/N_e \sim 3 \cdot 10^{-4}$ или $\delta N_e \sim 0.3 \text{ см}^{-3}$. Полученные оценки характеризуют вариации электронной концентрации, усредненной по всему пути ДИЮ в торе.

Как показано выше, посредством дорожек различимы МН не мельче френелевского масштаба (D_f) в проекции на картинную плоскость. Угол наклона неоднородностей к картинной плоскости невелик (около 30° для бурь 08.09.1987 и 09.10.1987 гг.). А сечение МН можно считать симметричным в силу равноправия направлений, перпендикулярных к вектору магнитного поля. Следовательно, длина пути ДИЮ в отдельной МН также порядка D_f . Поэтому путь ДИЮ в торе можно разбить на $N \sim \Delta D/D_f$ независимых МН. Оценим дисперсию электронной концентрации в таких слоях.

Наблюдаемая дисперсия σ_φ^2 фазы ДИЮ определяется суммой дисперсий набегов фазы ($\sigma_{\varphi_i}^2$) на отдельных неоднородностях, которые лежат на пути излучения:

$$\sigma_\varphi^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{\varphi_i}^2 \approx (\pi\kappa D_f/\lambda f^2)^2 \sigma_{N_e}^2 N, \quad (2)$$

где $N = \Delta D/D_f \sim 500$ — число различимых, независимых слоев на пути излучения в торе, σ_{N_e} — дисперсия электронной концентрации в таких слоях. Учитывая, что $\sigma_\varphi \sim \delta\varphi$, из (1) и (2) следует оценка минимальной амплитуды вариаций N_e , достаточных для регистрации модуляционных дорожек: $\sigma_{N_e}/N_e \sim (\delta\varphi/\Delta\varphi)N^{1/2} \sim 0.007$.

Следовательно, достаточным условием наблюдения модуляционных дорожек является наличие малых флуктуаций ($\sim 0.7\%$) электронной концентрации в волокнах тора Ио, вытянутых вдоль магнитного поля и имеющих поперечники френелевского масштаба (~ 140 км). Волокнистая структура тора подтверждена измерениями *in situ* с борта космической станции «Галилей» [19].

Крупномасштабная модуляция. Модуляционные дорожки тора Ио наблюдаются не всегда. Радиобури без дорожек даже выделены в особый тип модуляции — L1 [18]. На динамических спектрах видно, что модуляционные дорожки могут наблюдаться, а затем исчезать на протяжении одной и той же радиобури [18]. Следовательно, есть неописанная пока модуляция рассеяния ДИЮ с характерным временем, много большим периода следования модуляционных дорожек.

Чтобы выявить такую модуляцию, были произведены оценки числа дорожек на единице площади динамического спектра. Технически это осуществлялось путем подсчета числа дорожек N_d , попадающих в прямоугольное окно фиксированных размеров ($\Delta t = 6$ с; $\Delta f = 2.5$ МГц). Положение окна выбирались таким, чтобы выполнялись три условия:

- а) стороны окна ориентированы параллельно осям времени и частоты;
- б) размещение окна в диапазоне частот 20—25 МГц;
- в) подсветка всей площади окна фоновым ДИЮ.

На каждом динамическом спектре радиобури 08.09.1987 из альбома Й. Й. Риихимаа [18] было выбрано как можно больше (4—13) неперекрывающихся положений окна. На основе оценок плотности дорожек, полученных таким способом, вычислялись средняя плотность $\langle \rho \rangle = \langle N_d \rangle / \Delta t \Delta f$ и ее средняя квадратичная ошибка σ_ρ для данного спектра.

Изменение $\langle \rho \rangle$ со временем показано на рис. 4, а. Хорошо выражено постепенное уменьшение плотности дорожек с характерным масштабом времени $\tau \geq 60$ мин. На этот тренд наложена флуктуация, длящаяся $\tau \sim 10$ мин.

Для проверки реальности таких кратковременных флуктуаций оценки плотности дорожек были выполнены и на динамическом спектре радиобури Ио-А, записанной 08.09.1999 г. на радиотелескопе УТР-2 РИ НАН Украины А. В. Архиповым, Б. П. Рябовым, В. А. Шевченко. Использовалось квадратное окно 60×60 пикселей, что соответствует $\Delta t = 60$ с и $\Delta f = 4.44$ МГц ($13.33 < f < 17.78$ МГц). Индивидуальные оценки плотности ρ дорожек представлены на рис. 4, б. Четко видны быстрые циклические флуктуации ρ с $\tau \approx 6$ мин, а также волнообразный ход огибающей кривой с $\tau \geq 60$ мин. По-видимому, отмеченная цикличность ρ не является артефактом, возникающим из-за временного отсутствия подсветки тора Ио. Ведь подсчеты числа дорожек осуществлялись только в тех областях динамического спектра, где наличие ДИЮ не вызывало сомнений и гарантировало обнаружение модуляционных дорожек по всей исследуемой площадке (см. условие «в» выше). Заметим, что на рис. 4, б максимальное значение ρ приходится на область спектра с относительно низким значением среднего потока ДИЮ, а минимальная плотность дорожек в конце спектра наблюдается на фоне интенсивного излучения.

Согласно диаграмме Й. Й. Риихимаа [18, рис. 57], дважды модуляционные дорожки не наблюдались вообще на протяжении 2.2 и 2.8 ч наблюдений. Этот факт позволяет подозревать существование модуляции рассеяния ДИЮ с $\tau > 2$ ч.

Пути к интерпретации. В принципе возможны две группы гипотез о природе отмеченных модуляций:

- а) пространственные вариации σ_{Ne} в виде пучков мелкомасштабных неоднородностей тора Ио;
- б) временная модуляция σ_{Ne} волнами плотности магнитозвука, распространяющимися в торе Ио.

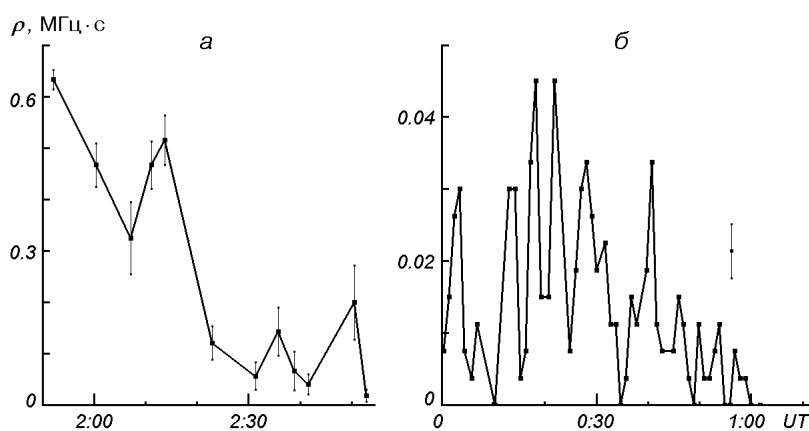


Рис. 4. Вариации плотности ρ модуляционных дорожек тора Ио на динамических спектрах декаметрового радиоизлучения Юпитера: а — радиобури 08.09.1987 г. [18]; б — радиобури 08.09.1999 г.

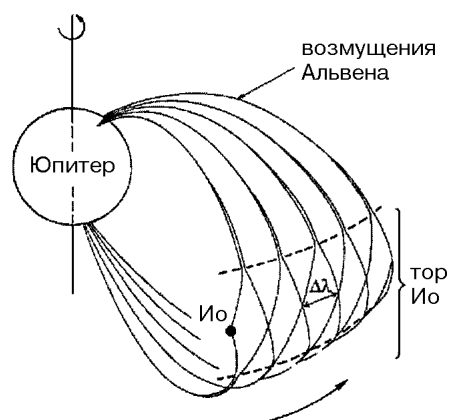


Рис. 5. Схема формирования системы альвеновских возмущений тора Ио

Различить эти возможности непросто, так как траектория ДИЮ в торе является функцией времени. Пока же имеет смысл лишь наметить основные направления дальнейших исследований.

Характерное время изменения плотности в магнитозвуковой волне составляет $\tau_d \sim L/V_A$, где L — длина волны, $V_A \sim 300$ км/с — типичная скорость магнитозвука в торе Ио (близка к скорости Альвена) [4]. В случае мелкомасштабной неоднородности $\tau_d \sim D_f/V_A \sim 0.5$ с, что гораздо меньше времени наблюдения индивидуальных модуляционных дорожек (~ 30 с на рис. 1 и даже 70 с [11, рис. 1]). Фактически это различие еще больше из-за конечной полосы частот спектроанализаторов и кратковременной подсветки тора ДИЮ. Следовательно, мелкомасштабная модуляция не может иметь волновую природу. Это пространственные вариации N_e , относительно стабилизированные (например, избыточным давлением локального магнитного поля [19] или пинч-эффектом электрических токов волн Альвена).

Волны плотности могли бы проявиться как собственные частоты волновода, каковым является тор Ио. Характерный период $2\Delta D/V_A \sim 8$ мин стоячей магнитозвуковой волны основной моды (в поперечнике тора укладывается полуволна) оказывается одного порядка с наблюдаемой модуляцией в 6—10 мин. Если же рассмотреть волну, распространяющуюся вдоль оси тора, то получим период модуляции $2\pi R_{\text{Ио}}/V_A \sim 2.4$ ч (где $R_{\text{Ио}} = 5.9R_J$ — радиус орбиты Ио). Для исчезновения дорожек за время порядка 1 ч, необходимы вариации σ_{N_e} и N_e в несколько раз. Однако по данным оптической спектроскопии в торе Ио не обнаружено заметных изменений (> 2 раз) электронной концентрации с периодами от 10 мин до 7 ч при разрешении до 1400 км [8]. Тем не менее, вариации σ_{N_e} при еще больших τ могли бы отражать наблюдавшиеся изменения плотности тора Ио за время порядка 10 сут [20].

В качестве альтернативной интерпретации часовой модуляции можно рассмотреть увеличение мелкомасштабной неоднородности тора за счет пинчевания плазмы токами альвеновских крыльев Ио. Такие токи обнаружены *in situ* [7], они достигают $1.2 \cdot 10^7$ А [14]. Альвеновские волны Ио отражаются от полярной ионосферы Юпитера и формируют сложную систему стоячих волн во всем торе (рис. 5 [5, 6]). Соответствующие электрические токи, параллельные магнитному полю, способны создавать слабые локальные избытки N_e за счет пинч-эффекта [1, С. 219—226]. Система стоячих волн Альвена формирует в торе Ио сеть из участков возмущенной плазмы, отстоящих по долготе на $\Delta\lambda \approx 7^\circ$ [6, рис. 8]. Эта сеть фиксирована относительно Ио, а относительно наблюдателя вращается с угловой скоростью движения спутника по орбите ($\omega = 8.48^\circ/\text{ч}$). Соответст-

венно области возмущенной и невозмущенной плазмы тора проецируются на источник ДИЮ с характерным периодом $\Delta\lambda/\omega \approx 0.8$ ч.

Для модуляции с $\tau = 6\text{—}10$ мин потребовались бы альвеновские возмущения тора, следующие с периодом $2\pi\tau D/P_{\text{Ио}} \approx 0.1R_J$, где $P_{\text{Ио}} = 1.53 \cdot 10^5$ с — орбитальный период Ио; $D = 5.1R_J$ (см. выше). Эта оценка совпадает с поперечником Ио как проводника, т. е. с суммой диаметра спутника (3630 км), слоя ионосферы со стороны набегающего потока плазмы тора (200 км) и ионосферы позади Ио (3000 км) [15]. Заметим, что размер Ио является характерным масштабом поперечника альвеновских крыльев спутника [5]. Следовательно, модуляция амплитуды дорожек с периодом 6—10 мин может отражать и субструктуру альвеновских возмущений тора.

Если же крупномасштабную модуляцию интерпретировать просто как пространственные вариации σ_{Ne} , ковращающиеся с Юпитером, то приходится допустить наличие пучков мелкомасштабных неоднородностей с характерным поперечником пучка $2\pi\tau D/T \sim 0.4R_J$ (при $\tau \approx 8$ мин) или $3R_J$ (при $\tau \sim 1$ ч). Эти масштабы физически не выделены, и потому данная интерпретация представляется наименее интересной.

Выбор между рассмотренными альтернативами возможен лишь на основе более обширного экспериментального материала.

ВЫВОДЫ

1. Судя по дисперсии скоростей частотного дрейфа, дорожки формируются в слое плазмы существенной толщины порядка R_J . Это соответствует поперечнику горячего тора Ио, но противоречит гипотезам о рассеянии ДИЮ непосредственно на вулканических выбросах Ио или на неровностях тонкой ($\sim 0.2R_J$, [4]) внутренней границы этого тора [12].

2. Небольшая часть модуляционных дорожек сформирована рассеянием ДИЮ на неоднородностях тора Европы, который примыкает к внешней границе горячего тора Ио.

3. Модуляционные дорожки формируются слабыми ($\sim 0.7\%$) вариациями электронной концентрации в горячем торе Ио. Эти неоднородности вытянуты вдоль магнитного поля, имеют френелевские (~ 140 км) поперечники перпендикулярно к полю и живут десятки секунд и более. Столь тонкие и долгоживущие образования трудно интерпретировать как волны плотности.

4. Амплитуда модуляционных дорожек изменяется с различными шкалами времени: 6—10 мин, 1 ч, а возможно и более. Такие вариации могут пролить свет на волны плотности в торе и возмущения тора движением Ио.

Автор глубоко признателен Й. Й. Риихимаа за отчет о его многолетних исследованиях модуляционных дорожек, а также Н. А. Цвык за обсуждение результатов работы.

1. Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967.—260 с.
2. Архипов А. В. О модуляционных дорожках в спектре дециметрового радиоизлучения Юпитера: радиостанции // Кинематика и физика небесных тел.—2003.—19, № 5.—С. 387—396.
3. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. — М.: Наука, 1984.—С. 276—281.
4. Салливан Дж. Д., Сиско Дж. Л. Наблюдения плазменного тора Ио // Спутники Юпитера. — М.: Мир, 1986.—Т. 3.—С. 238—263.
5. Vagenal F. Alfvén wave propagation in the Io plasma torus // J. Geophys. Res.—1983.—88, N A4.—P. 3013—3025.

6. *Bagenal F., Leblanc Y.* Io's Alfvén wave pattern and the Jovian decametric arcs // *Astron. Astrophys.*—1988.—**197**, N 1/2.—P. 311—319.
7. *Belcher J. W., Goertz C. K., Sullivan J. D., Acuna M. H.* Plasma observations of the Alfvén wave generated by Io // *J. Geophys. Res.*—1981.—**86**, N A10.—P. 8508—8512.
8. *Brown R. A., Shemansky D. E.* On the nature of SII emission from Jupiter's hot plasma torus // *Astrophys. J.*—1982.—**263**, N 1.—P. 433—442.
9. *Connerney J. E. P., Acuna M. H., Ness N. F., Satoh T.* New models of Jupiter's magnetic field constrained by the Io flux tube footprint // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N A6.—P. 11929—11939.
10. *Genova F., Aubier H. G., Lecacheux A.* Modulations in Jovian decametric spectra: propagation effects in terrestrial ionosphere and Jovian environment // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**104**, N 2.—P. 229—239.
11. *Imai K., Reyes F., Carr T. D.* Modulation lane measurement of Jupiter's Io-B source parameters // *Planetary Radio Emissions V* / Eds. H. O. Rucker, M. L. Kaiser, Y. Leblanc.—Vienna: Austrian Acad. Sc. Press, 2001.—P. 119—126.
12. *Imai K., Wang L., Carr T. D.* Origin of Jupiter's decametric modulation lanes // *Planetary Radio Emissions III* / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, B. M. Pedersen. — Vienna: Austrian Acad. Sc. Press, 1992.—P. 69—90.
13. *Imai K., Wang L., Carr T. D.* Modeling Jupiter's decametric modulation lanes // *J. Geophys. Res.*—1997.—**102**, N A4.—P. 7127—7136.
14. *Kivelson M. G., Khurana K. K., Walker R. J.* A magnetic signature at Io: initial report from the Galileo magnetometer // *Science.*—1996.—**273**, N 5273.—P. 337—340.
15. *Kliore A. J., Herrera R. G., Hinson D. P., et al.* The Ionosphere of Io and the Plasma Environments of Europa, Ganymede, and Callisto // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1998.—**30**, N 4.—P. 1450.
16. *Lagg A., Krupp N., Woch J., Williams D. J.* In-situ observations of a neutral gas torus at Europa // *Geophys. Res. Lett.*—2003.—**30**, N 11.—P. 10—11.
17. *Mauk B. H., Mitchell D. G., Krimigis S. M., et al.* Energetic neutral atoms from a trans-Europa gas torus at Jupiter // *Nature.*—2003.—**421**, N 6926.—P. 920—922.
18. *Riihimaa J. J.* Modulation lanes revisited. — Oulu: Univ. Oulu, 1993.—92 p.
19. *Russell C. T., Kivelson M. G., Khurana K. K.* Depleted Flux Tubes in the Jovian Magnetosphere // EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6—11 April 2003, abstract N3144.
20. *Thomas N.* The variability of the Io plasma torus // *J. Geophys. Res.*—1993.—**98**, N E10.—P. 18737—18750.

Поступила в редакцию 15.11.04