

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:
нижняя магнитосфера**

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 нижней магнитосферы Юпитера.

ПРО МОДУЛЯЦІЙНІ ДОРІЖКИ У СПЕКТРІ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА: НИЖНЯ МАГНІТОСФЕРА, 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 нижньої магнітосфери Юпітера.

ON MODULATION LANES IN SPECTRA OF JOVIAN DECAMETRIC RADIO EMISSION: LOW MAGNETOSPHERE, 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 Jovian inner magnetosphere.

1. ВВЕДЕНИЕ

Состояние магнитосферной плазмы в непосредственной близости от Юпитера остается одной из нерешенных проблем. Объектом исследования в этой работе является наименее изученная часть магнитосферы на высотах ниже двух радиусов планеты, которая в дальнейшем именуется нижней магнитосферой Юпитера. Эта область интересна уже тем, что именно здесь генерируется декаметровое радиоизлучение Юпитера (ДИЮ), природа которого во многом остается неясной.

Современные представления о нижней магнитосфере Юпитера довольно противоречивы. Отсутствие прямых измерений электронной концентрации и температуры там восполнялось ненадежной экстраполяцией данных, полученных с помощью космических межпланетных станций либо в ионосфере Юпитера, либо на значительном удалении от центра планеты. В результате оценки концентрации электронов разбросаны в широком диапазоне от 0.1 см^{-3} [20] до 5000 см^{-3} [1, 19] и даже более [6]. К сожалению, прямые измерения с борта космической станции «Галилей» ситуацию не прояснили.

Поэтому весьма актуальны исследования нижней магнитосферы Юпитера с привлечением других методов. Такую возможность дают модуляционные дорожки — светлые и темные полосы в динамическом спектре декаметрового излучения Юпитера, дрейфующие по частоте со скоростями порядка 100 кГц/с . К. Имаи и др. убедительно показали, что большинство модуляционных дорожек возникает в результате рассеяния ДИЮ на неоднородностях тора плазмы, окружающего орбиту спутника Ио [12]. 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. Однако часть модуляционных дорожек демонстрирует противоположный дрейф по частоте, чем это следует из направления вращения тора Ио. Как удалось показать автору статьи, эти ранее необъясненные дорожки формируются неоднородностями именно нижней магнитосферы Юпитера [2]. Их удобно называть «ближними» (к источнику ДИЮ) дорожками, в отличие от дорожек тора Ио.

Ниже будет предпринята попытка использовать ближние модуляционные дорожки для получения информации о практически неизученной полярной магнитосфере Юпитера.

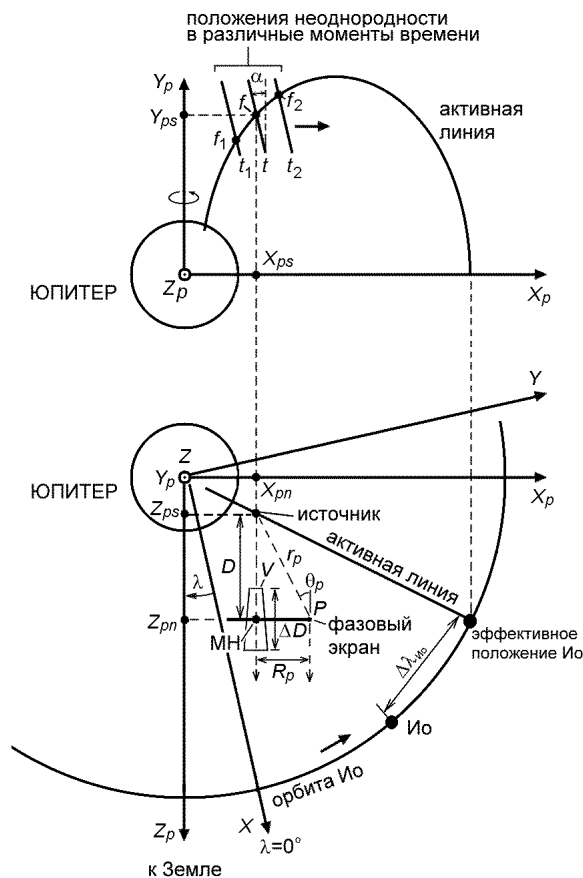
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С помощью модуляционных дорожек можно изучать расположение магнитосферных неоднородностей в пространстве и судить об их природе.

Место расположения неоднородности на прямой радиоисточник — Земля может быть вычислено по скорости частотного дрейфа модуляционной дорожки. Алгоритм расчета (DL) описан в работе [3] и пояснен на рис. 1. Его суть заключается в подборе такого расстояния D радиоисточник — неоднородность, при котором расчетная скорость дрейфа дорожки совпадает с наблюдаемой. При этом скорость дрейфа вычисляется по заданной модели магнитного поля (VIP4 [10]), путем проекции на картинную плоскость силовых линий, соответствующих источнику ДИЮ и магнитосферной неоднородности. Для двух моментов времени ($t_1 = t - dt/2$, $t_2 = t + dt/2$) численно находится точка проекции магнитосферной неоднородности на активную силовую линию, где генерируется излучение на частоте f , близкой к локальной циклотронной частоте электронов. Скорость дрейфа дорожки находится как отношение сдвига этой частоты df за время dt (т. е. df/dt).

Этим способом для каждой модуляционной дорожки можно вычислить координаты точки, где излучение пересекает магнитосферную неоднородность: $X_p = X_{ps}$, $Y_p = Y_{ps}$ 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 перпен-

Рис. 1. Схема формирования модуляционных дорожек, используемые системы координат и обозначения (вверху — вид с Земли; внизу — проекция на экваториальную плоскость Юпитера, вид со стороны северного полюса)



дикулярно, в северное полушарие планеты. Переход к системе координат планетарного магнитного поля XYZ осуществим с помощью матрицы поворота, описанной в работе [3].

Такого рода исследования весьма актуальны, поскольку распределение магнитосферных неоднородностей в пространстве до сих пор не изучалось. Остаются неизвестными и характеристики магнитосферных неоднородностей. Кроме того, видимость модуляционных дорожек может ухудшаться при слишком малых D . Это представляет интерес для оценивания размера источника ДИЮ.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

За более чем три десятилетия наблюдений модуляционных дорожек ДИЮ их спектры редко публиковались. В настоящее время лучший наблюдательный материал издан Й. Й. Риихимаа [16]. В этом атласе особый интерес представляет максимально длинная серия динамических спектров радиобури Ио-В, записанной 08.09.87 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. Из этой серии были выбраны шесть спектров [16, №№ 6—12], на которых сканировались участки, демонстрирующие четкие модуляционные дорожки нижней магнитосферы при практическом отсутствии дорожек тора Ио (рис. 2, а).

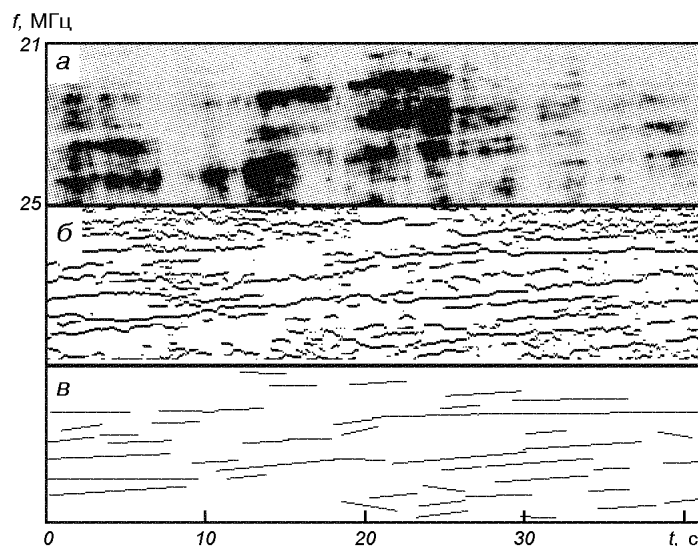


Рис. 2. Пример обработки динамического спектра ДИЮ: *a* — исходный фрагмент спектра 08.09.1987 [16]; *б* — схема локальных минимумов потока ДИЮ; *в* — линейная аппроксимация и отбор модуляционных дорожек не короче 50 пикселей

Сканирование выполнено для частот 20—25 МГц в интервале 02:22—02:54 всемирного времени.

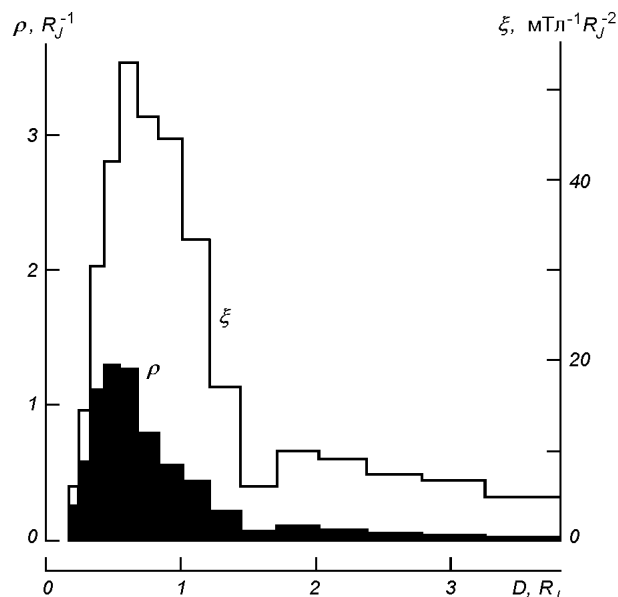
Обработка отобранного материала была автоматизирована путем применения пакета специально созданных алгоритмов. Сначала спектр трансформировался в схему локальных минимумов потока F ДИЮ. Использование минимумов позволяет отфильтровать стационарные помехи. Для подавления межпланетного мерцания спектр исследовался путем анализа разночастотных данных, относящихся к одному моменту времени (сканирование вдоль столбца изображения спектра). В окрестности каждой частоты вычисляется изменение среднего градиента потока dF/df и проверяется условие минимума функции $F(f)$. Каждый обнаруженный минимум наносится на схему (рис. 2, б), а его координаты (t, f) записываются в файл для последующей обработки, которая заключается в формировании цепочек из найденных экстремумов. Достигается это поиском на схеме ближайшего минимума $F(f)$, удаленного не далее двух пикселей от текущей точки данной цепочки. В результате каждому минимуму потока присваивается номер цепочки. Следующий алгоритм для каждой цепочки методом наименьших квадратов вычисляет параметры аппроксимирующей прямой (рис. 2, в). В итоге формируется банк данных об индивидуальных модуляционных дорожках.

Суммарный банк данных, полученных по разным спектрам, включает сведения о 313 наиболее длинных дорожках (предел длины дорожек необходим для снижения вклада в статистику шумовых помех). Эти данные являются основой для последующего анализа.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ

С помощью алгоритма DL для каждой дорожки было определено расстояние D магнитосферной неоднородности от радиисточника. При этом учтено, что радиисточник находился на магнитной силовой линии, проходящей через эффективное положение Ио, в той точке линии, где частота излучения ($f \sim 22.5$ МГц) близка к локальной циклотронной частоте электронов. Разность долгот истинного и эффективного положений Ио, известная как

Рис. 3. Распределение модуляционных дорожек по удалению D от радиоисточника: ρ — плотность вероятности; ξ — вероятность наблюдения дорожки, приходящаяся на единицу магнитного потока



угол опережения $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$, может быть определена для данной радиобури по df/dt модуляционных дорожек тора Ио (для них D близко к радиусу орбиты Ио). Используя оценки df/dt дорожек Ио, опубликованные Й. Й. Риихимаа для радиобури 08.09.87 [16], с помощью алгоритма OPER [3] было подобрано оптимальное значение $\Delta\lambda_{\text{Ио}} = 45^\circ \pm 1.6^\circ$, которое и было положено в основу расчетов.

Рис. 3 демонстрирует распределение плотности вероятности магнитосферных неоднородностей $\rho = \Delta n/N\Delta D$ по удалению D от радиоисточника, где N — суммарное число модуляционных дорожек, Δn — число дорожек, попадающих в интервал дистанций ΔD . Узкий максимум отражает известный факт определенной ориентации модуляционных дорожек на динамических спектрах ДИЮ.

Построенную гистограмму необходимо освободить от геометрических искажений. Во-первых, за время наблюдений ($\delta t = 32$ мин) Юпитер поворачивается на некоторый угол. Поэтому на луче зрения интервал ΔD , в котором подсчитывается число неоднородностей, во вращающейся магнитосфере и на разных дистанциях от источника выметает неодинаковые площади. Это приводит к завышению значений ρ на больших дистанциях от источника. Во-вторых, за то же время заметно смещается радиоисточник, следуя движению Ио. В-третьих, магнитосферные неоднородности вытянуты вдоль магнитных силовых линий, которые расходятся при удалении от Юпитера. Соответственно с увеличением D уменьшается пространственная плотность магнитосферных неоднородностей. Учесть указанные эффекты можно путем вычисления числа ξ модуляционных дорожек, приходящееся на единицу магнитного потока Φ . Этот поток проходит через объем пространства (V на рис. 1), охваченный подсчетами магнитосферных неоднородностей. Площадь сечения объема V плоскостью, перпендикулярной к магнитному полю, и соответствующее значение Φ вычислялись для заданного набора параметров ($D, \Delta D, t, \delta t, f$), согласно небесномеханическим алгоритмам Ж. Мееса [5] и модели магнитного поля VIP4 [10].

Исправленное распределение магнитосферных неоднородностей по D имеет вид $\xi = \Delta n/N\Phi$ (рис. 3). Очевидна концентрация большинства модуляционных дорожек в ограниченном интервале дистанций от источника ($0.17 < D/R_J < 1.45$). По-видимому, уменьшение числа дорожек при

Сводка наиболее вероятных значений координат неоднородностей нижней магнитосферы Юпитера

Дата	Время, UT	f , МГц	$\Delta\lambda_{\text{Ио}}$, град	D/R_J	λ , град	θ , град	Спектр
04.11.1976	22:12	22	39	0.49	154	47	[17, рис. 6b]
26.09.1978	5:21	27.5	39*	0.56	160	49	[11, рис. 8a]
23.03.1979	20:49	27	31	0.38	168	47	[11, рис. 1b]
27.07.1979	14:26	30	39	0.46	158	49	[11, рис. 9]
08.09.1987	2:00	23	45	0.48	142	44	[16, рис. 23]
08.09.1987	2:32	22.5	45	0.42	153	46	[16, рис. 26]
08.09.1987	2:53	22.5	45	0.51	158	47	[16, рис. 28]
09.10.1987	22:43	22.5	33	0.48	156	47	[16, рис. 33]
17.11.1987	19:44	22.5	39	0.50	158	47	[16, рис. 39]
27.09.1988	23:43	25.25	34	0.44	157	47	[16, рис. 46]
23.08.1997	2:33	22.5	32	0.57	160	48	[13, рис. 1]
27.02.2000	15:40	19.7	46	0.15	159	43	[14, рис. 7]
30.03.2000	12:38	24.2	38	0.32	165	46	[18, рис. 8]

* — принято согласно [3]

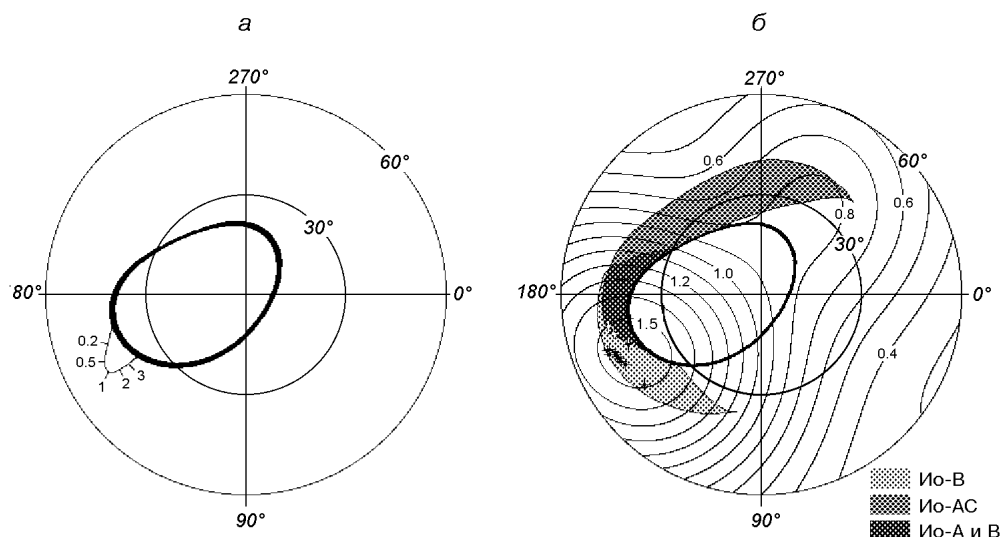


Рис. 4. Локализация оснований магнитных линий магнитосферных неоднородностей на поверхности Юпитера: *a* — линия оснований магнитосферных неоднородностей для средних значений частоты и времени гистограммы на рис. 3 (указаны значения D/R_J); *б* — основания тех областей магнитосферы, которые проецируются на радиобури различных типов (выделены), вероятнейшие положения оснований магнитосферных неоднородностей согласно опубликованным спектрам (крестики, таблица), линии равной напряженности магнитного поля на поверхности (маркировка в мТл). Овалы — след магнитной трубки Ио. Показана сетка юпитерографических координат (долгота в системе III 1965 и коширота)

больших D вызвано падением электронной концентрации на больших высотах. А дефицит дорожек при малых D обусловлен сглаживанием интерференционного узора из-за конечного монохроматического размера радиоисточника.

Большой интерес представляет и долготное распределение магнитосферных неоднородностей. Так, в таблице собраны данные обо всех известных автору публикациях динамических спектров ДИЮ, четко демонстрировавших ближние модуляционные дорожки. По возможности в каждом случае кроме дрейфа дорожек нижней магнитосферы определялись df/dt и дорожек тора Ио. Это позволяло определять угол опережения $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ и более точно рассчитывать D для наиболее вероятного значения ближнего дрейфа. Поскольку известны значение D и момент времени наблюдений, на пути излучения к Земле можно найти точку, около которой чаще всего формируются

модуляционные дорожки. От этой точки проследим магнитную силовую линию магнитосферной неоднородности до поверхности Юпитера. Долгота λ и коширота θ оснований таких линий магнитосферных возмущений приведены в таблице и нанесены на карту поверхностной напряженности магнитного поля (рис. 4).

Несмотря на то, что наблюдения проводились в разные годы, основания наиболее ярко выраженных магнитосферных возмущений концентрируются в компактной области ($\lambda = 158^\circ \pm 6^\circ$; $\theta = 47^\circ \pm 2^\circ$) поперечником всего $0.1R_J$. Особенно интересно то, что эта область совпадает с магнитной аномалией Юпитера — максимумом напряженности поля на большом удалении от магнитного полюса планеты. Это обстоятельство позволяет предположить связь между модуляционными дорожками и магнитным полем.

Опубликованный экспериментальный материал позволяет привести еще один довод в пользу такой связи. Для этого найдем траекторию основания магнитной линии магнитосферной неоднородности при изменении D от 0 до $6R_J$ (рис. 4, а). Совокупность таких кривых, вычисленных при различных положениях радиоисточника и наблюдателя, определяет основание той части нижней магнитосферы, в которой формируются модуляционные дорожки. Такие зоны, охваченные наблюдениями, показаны на рис. 4, б. Они вычислены отдельно для радиобурь Ио-В и Ио-АС. Соответствующие им долготы Ио и центрального меридиана Юпитера взяты согласно данным наблюдений [16]), использованы типичные значения частоты излучения 22.5 МГц и угла опережения 39° [3]. Из рис. 4 следует, что максимальная напряженность магнитного поля попадает в зону радиобурь Ио-В, а минимальная — в зону Ио-С. Как раз модуляционные дорожки лучше всего видны на фоне излучения Ио-В, более редки в радиобурях Ио-А, а в Ио-С не замечены [11, 16].

ПАРАМЕТРЫ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НИЖНЕЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Взаимные пересечения дорожек позволяют оценить лишь нижний предел длины соответствующих магнитосферных неоднородностей. Согласно используемому банку данных о модуляционных дорожках наблюдавшаяся длина магнитосферной неоднородности вдоль магнитных силовых линий доходит до 2000 км, а по десяти самым длинным дорожкам в среднем равна 1540 км.

Характерный поперечник магнитосферной неоднородности на картинной плоскости можно оценить по периоду P следования модуляционных дорожек: $d = 2\pi DP \cos \alpha / T$, где α — видимый наклон магнитосферной неоднородности к оси вращения Юпитера (рис. 1); $T = 3.57 \cdot 10^4$ с — период вращения планеты. Из-за межпланетных мерцаний значение P надежнее определять по среднему интервалу Δf частот между дорожками: $P = \Delta f / (df/dt)$. С этой целью для столбцов каждого динамического спектра ДИЮ строились спектры Фурье, которые затем усреднялись в спектр мощности. Его пик соответствует $\Delta f = 437 \pm 16$ кГц/с. Так как средний дрейф дорожек составляет $df/dt = -29.0 \pm 1.3$ кГц/с, их период равен $P = 15.1 \pm 1.2$ с. С помощью алгоритма DL [3] получено $D = 0.50R_J$ и $\cos \alpha = 0.62$. Соответственно имеем $d = 58 \pm 5$ км, что близко к характерному поперечнику первой зоны Френеля (френелевскому масштабу): $M_1 = 2(\lambda D)^{1/2} = 44$ км, где λ — длина радиоволны при $f = 22.5$ МГц. Это свидетельствует об интерференционной природе модуляционных дорожек. Соответственно характерный поперечник магнитосферной неоднородности составляет $d \sim M_1$.

Величину характерной электронной концентрации N_e в магнитосферной неоднородности можно оценить «снизу» по масштабу минимальных изменений фазы радиоизлучения, которые достаточны для наблюдения модуляционных дорожек. Порогом обнаружения последних будем считать амплитуду изменения потока ДИЮ в два раза при учете интерференционных минимумов и максимумов. Для грубой оценки рассмотрим изолированную магнитосферную неоднородность, погруженную в среду с однородной концентрацией электронов n_e .

В приближении фазового экрана, точечного радиоисточника и бесконечно удаленной антенны вычислим нормированный поток ДИЮ как отношение наблюдаемого потока, прошедшего магнитосферную неоднородность, к невозмущенному потоку в фоновой плазме:

$$F = |I_1|^2 / |I_2|^2. \quad (1)$$

Здесь интерференционные интегралы I_1 , I_2 на бесконечном фазовом экране Σ (рис. 1) можно аппроксимировать интегралами в ограниченной области Σ_m , заключенной внутри квазисвободной от влияния магнитосферной неоднородности зоны Френеля с номером $m \gg 1$:

$$I_1 = \int_{\Sigma} (\cos\theta_p / r_p) e^{i(\varphi + \Delta\varphi)} d\sigma \approx \left[\int_{\Sigma_m} e^{i(\varphi + \Delta\varphi)} d\sigma + \int_{\Sigma_{m-1}} e^{i(\varphi + \Delta\varphi)} d\sigma \right] / 2D, \quad (2)$$

$$I_2 = \int_{\Sigma} (\cos\theta_p / r_p) e^{i\varphi} d\sigma \approx \left[\int_{\Sigma_m} e^{i\varphi} d\sigma + \int_{\Sigma_{m-1}} e^{i\varphi} d\sigma \right] / 2D, \quad (3)$$

где: r_p — расстояние между радиоисточником и произвольной точкой фазового экрана (практически $r_p \approx D$ в существенных зонах Френеля); $\theta_p \ll 1$ — угол падения ДИЮ на фазовый экран в данной точке P (рис. 1); $\varphi = -\pi R_p^2 / (D\lambda)$ — фаза волны от точки P экрана при распространении излучения к Земле в вакууме; R_p — удаление точки P от центра фазового экрана; λ — длина волны ДИЮ; $d\sigma$ — элемент фазового экрана; $\Delta\varphi$ — поправка к фазе за счет распространения радиоволны в магнитосферной неоднородности. Неоднородность будем моделировать прямой полосой шириной d и длиной не менее поперечника последней учитываемой зоны Френеля. В пределах этой полосы будем считать $\Delta\varphi = \text{const}$, а вне ее $\Delta\varphi = 0$.

Численное интегрирование по $m = 17$ зонам Френеля показало, что двухкратный перепад F в интерференционной картине получается при минимальном значении $\Delta\varphi \approx 0.5$ рад в широком диапазоне размеров магнитосферных неоднородностей ($0.25 \leq d/M_1 \leq 1$). Результат справедлив для любых λ и D , так как F не зависит от абсолютного масштаба задачи, а только от отношения параметров. Следовательно, модуляционные дорожки становятся обнаружимыми, если $\Delta\varphi$ достигает порога $\Delta\varphi_{\min} \approx 0.5$ рад. Фактически это оценка снизу, так как при $d > M_1$ или $d < M_1/4$ требуются еще большие $\Delta\varphi$.

На границе видимости модуляционных дорожек набег фазы радиоволны в магнитосферной неоднородности равен пороговому значению $\Delta\varphi_{\min}$:

$$\Delta\varphi \approx -2\pi\delta D\Delta n/\lambda = \Delta\varphi_{\min}, \quad (4)$$

где $\Delta n = n - n_\phi$ — разность показателей преломления n магнитосферной неоднородности и окружающей среды (n_ϕ) на данном удалении D от радиоисточника; δD — путь излучения в магнитосферной неоднородности. Для вычисления n и n_ϕ использовалось дисперсионное уравнение необыкновенной моды (именно ей соответствует поляризация ДИЮ [15]) в стандартном приближении холодной замагниченной плазмы [4]:

$$n^2 = 1 - 2\nu(1 - \nu) / \{2(1 - \nu) - u \sin^2 \psi - [u^2 \sin^4 \psi + 4u(1 - \nu)^2 \cos^2 \psi]^{1/2}\}, \quad (5)$$

где $\nu = f_p^2 / f^2$; $f_p = (n_e / \kappa)^{1/2}$ — плазменная частота ($\kappa = 12400 \text{ см}^{-3} \text{ МГц}^{-2}$); $u = f_c^2 / f^2$; ψ — угол между вектором магнитного поля в магнитосферной неоднородности и направлением на Землю. Последовательными приближениями подбиралась такая концентрация электронов в (5), которая обеспечивала достаточное n , чтобы при его подстановке в (4) выполнялось условие видимости модуляционных дорожек $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\min}$.

Хотя в картинной плоскости наиболее заметны неоднородности с поперечниками порядка M_1 , но вдоль луча зрения формирование дорожки может происходить и на больших масштабах. Минимальная оценка характерной электронной концентрации N_e в магнитосферной неоднородности получится при максимальной толщине δD слоя плазмы, формирующего модуляционную дорожку. Если эффективное значение D дорожки соответствует приблизительно середине этого слоя, то допустимо принять: $\delta D \approx 2D$. Есть практика применения метода фазового экрана и в случае толстых рассеивающих слоев, например при оценках рассеяния ДИЮ в межпланетной среде [7, 8]. Тогда описанным способом получаем грубую оценку при $0.2 \leq D/R_J \leq 1$: $N_e \geq n_e + 0.1 \text{ см}^{-3}$, где n_e — концентрация электронов в плазме, окружающей магнитосферную неоднородность.

Сохранение параметров эллиптической поляризации ДИЮ во время радиобурь свидетельствует о крайне низкой электронной концентрации в нижней магнитосфере Юпитера: $n_e \sim 0.1 \text{ см}^{-3}$ (Ио-В; $f = 22.5 \text{ МГц}$ [20]). Следовательно, для наблюдения модуляционных дорожек достаточно флуктуаций электронной концентрации примерно в два раза, что представляется осуществимым.

Для наиболее вероятного значения $D = 0.5R_J$ и минимального значения $D = 0.17R_J$ дорожек (рис. 3) получено соответственно $N_e \geq 0.21 \text{ см}^{-3}$ и $N_e \geq 0.26 \text{ см}^{-3}$ (при $n_e = 0.1 \text{ см}^{-3}$). Такое увеличение порогового N_e всего на 24 % представляется слишком малым для утраты видимости дорожек. Вряд ли магнитосферные неоднородности имеют столь малую дисперсию по N_e . Поэтому более вероятной причиной дефицита дорожек при $D < 0.55R_J$ является их сглаживание за счет конечного размера S источника излучения. Указанный эффект сглаживает интерференционный узор, когда размер источника превышает масштаб Френеля: $S > M_1$. Модуляционные дорожки исчезают при $D \approx 0.17R_J$ (рис. 3), что соответствует $M_1 = 25 \text{ км}$. Отсюда следует оценка монохроматического размера источника ДИЮ: $S \approx 25 \text{ км}$.

ВЫВОДЫ

1. Модуляционные дорожки нижней магнитосферы Юпитера формируются неоднородностями электронной концентрации, вытянутыми вдоль магнитных силовых линий не менее чем на 1500 км. В картинной плоскости наиболее заметны неоднородности френелевского масштаба ($\leq 50 \text{ км}$ поперек магнитного поля). В принципе для наблюдения модуляционных дорожек достаточно флуктуаций электронной концентрации с амплитудой $\delta n_e \sim 0.1 \text{ см}^{-3}$, что близко к оценке средней концентрации по данным поляриметрии [20]. В этом случае дорожки формирует слой нижней магнитосферы Юпитера глубиной порядка $1R_J$, а среднее значение концентрации электронов составляет не менее $\delta n_e / 2 \approx 0.05 \text{ см}^{-3}$.

2. Неоднородность нижней магнитосферы Юпитера лучше всего выражена над областью максимального магнитного поля на поверхности Юпитера ($\lambda = 158^\circ$, $\theta = 47^\circ$) и проецируется на радиобури Ио-В. Область

минимальной напряженности магнитного поля проецируется на бури Ио-С, где модуляционные дорожки нижней магнитосферы Юпитера не замечены.

3. Впервые разрешен источник декаметрового радиоизлучения Юпитера. Его монохроматический размер равен примерно 25 км.

Полученные результаты актуальны в связи с разработкой проекта посылки космического зонда для непосредственного изучения полярной магнитосферы Юпитера [9]. Созданные алгоритмы планируется использовать и для изучения плазменного тора Ио методом модуляционных дорожек.

1. *Архипов А. В.* Рефракция декаметрового радиоизлучения Юпитера. I. Искажение диаграммы направленности S-компонента // Кинематика и физика небес. тел.— 1989.—5, № 5.—С. 68—74.
2. *Архипов А. В.* О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: частотные дрейфы // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, N 2.—С. 182—190.
3. *Архипов А. В.* О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: радиоисточники // Кинематика и физика небесных тел.—2003.—19, № 5.—С. 387—396.
4. *Железняков В. В.* Электромагнитные волны в космической плазме. — М.: Наука, 1977.—432 с.
5. *Меес Ж.* Астрономические формулы для калькуляторов. — М.: Мир, 1988.—168 с.
6. *Рябов Б. П., Герасимова Н. Н.* Декаметровое спорадическое радиоизлучение Юпитера. — Киев: Наук. думка, 1990.—С.153.
7. *Alimov V. A., Boiko G. N., Karashtin A. N., et al.* Spectrographic investigations of the structure of Jupiter's decametric radio emission sources // Planetary Radio Emissions V / Eds H. O. Rucker, M. L. Kaiser, Y. Leblanc. — Vienna: Austrian Acad. Sci. Press, 2001.—P. 179—185.
8. *Barrow C. H., Woan G., MacDowall R. J.* The effects of interplanetary scattering on radio observations of Jupiter at very low frequencies // Planetary Radio Emissions IV / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux. — Vienna: Austrian Acad. Sci. Press, 1997.—P. 369—381.
9. *Bolton S. J., et al.* A polar orbiter to probe Jupiter's deep atmosphere, interior structure and polar magnetosphere // Bull. Amer. Astron. Soc.—2003.—35, N4.—P. 1002.
10. *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.
11. *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.
12. *Imai K., Wang L., Carr T. D.* Modeling Jupiter's decametric modulation lanes // J. Geophys. Res.—1997.—102, N A4.—P. 7127—7136.
13. *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. Sci. Press, 2001.—P. 119—126.
14. *Konvalenko A. A., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H. O.* New instrumentations and methods for the low frequency planetary radio astronomy // Planetary Radio Emissions V / Eds H. O. Rucker, M. L. Kaiser, Y. Leblanc. — Vienna: Austrian Acad. Sci. Press, 2001.—P. 63—76.
15. *Lecacheux A., Boischoat A., Boudjada M. Y., Dulk G. A.* Spectra and complete polarization state of two, Io-related, radio storms from Jupiter // Astron. and Astrophys.—1991.—251, N 1.—P. 339—348.
16. *Riihima J. J.* Modulation lanes revisited. — Oulu: Univ. Oulu, 1993.—92 p.
17. *Riihima J. J.* L-bursts in Jupiter's decametric radio spectra // Astrophys. Space Sci.—1978.—56, N 2.—P. 503—518.
18. *Rucker H. O., Lecacheux A., Konvalenko A. A., Leitner M.* New frontiers in decameter radio astronomy // Planetary Radio Emissions V / Eds H. O. Rucker, M. L. Kaiser, Y. Leblanc. — Vienna: Austrian Acad. Sci. Press, 2001.—P. 51—61.
19. *Sentman D. D., Goertz C. K.* Whistler mode noise in Jupiter's inner magnetosphere // J. Geophys. Res.—1978.—83, N A7.—P. 3151—3165.
20. *Shaposhnikov V. E., Kocharovskiy V. V., Kocharovskiy V. V., et al.* Propagation effects influencing the observed polarization of the Jovian decametric emission // Planetary Radio Emissions IV / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux. — Vienna: Austrian Acad. Sci. Press, 1997.—P. 143—151.

Поступила в редакцию 13.04.04