

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: воздействие спутников

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 поиска магнитосферных возмущений, связанных со спутниками Юпитера.

ПРО МОДУЛЯЦІЙНІ ДОРІЖКИ У СПЕКТРІ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА: ВПЛИВ СУПУТНИКІВ, 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 пошуку проявів магнітосферних збурень, пов'язаних з супутниками Юпітера.

ON MODULATION LANES IN SPECTRA OF JOVIAN DECAMETRIC RADIO EMISSION: INFLUENCE OF SATELLITES, Arkhipov A. V. — Modulation lanes in spectra of Jovian decametric radio emission are formed by radiation scattering on field-aligned inhomogeneities in Jupiter's magnetosphere. A numerical algorithm for localization of magnetospheric inhomogeneities by the frequency drift of modulation lanes is used for the search for manifestations of satellites.

ВВЕДЕНИЕ

Планета Юпитер обладает магнитосферой с наиболее сложной структурой среди всех планет Солнечной системы. Отчасти эта сложность обусловлена наличием крупных спутников. Например, еще в 1974 г. был обнаружен плазменный тор, окружающий орбиту Ио [5]. В 2003 г. с помощью космической станции «Кассини» был открыт тор из продуктов испарения льдов Европы [21, 22]. Обнаружены обширные ионосферы у Ио, Европы и Ганимеда [20], движение которых в магнитном поле Юпитера приводит к

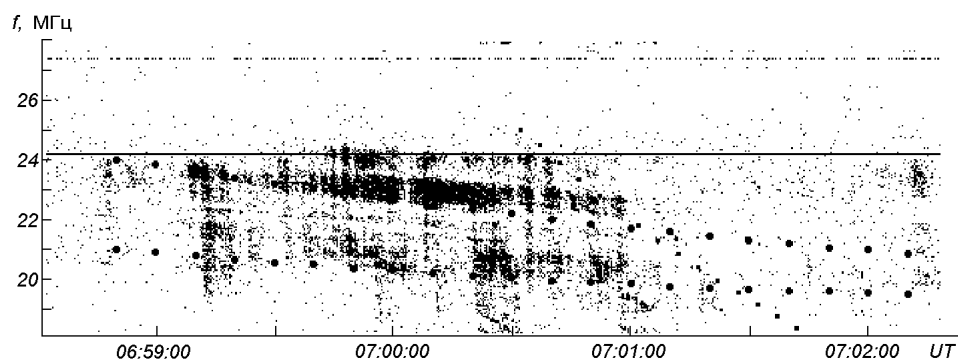


Рис. 1. Пример модуляционных дорожек в динамическом спектре декаметрового излучения Юпитера 10.02.2005 [17]. Для сравнения показаны результаты модельных расчетов дорожек для магнитной оболочки орбиты Ио (квадраты) и оболочки с экваториальным радиусом 207000 км (кружки), что близко к орбите Амальтеи

генерации электрических токов, ускорению частиц и появлению пятен полярных сияний в основаниях магнитных трубок этих спутников [10].

Однако, как правило, эти феномены исследовались лишь эпизодически с помощью космических аппаратов. Только некоторые эффекты, связанные главным образом с Ио, считаются доступными для изучения средствами наземной астрономии: полярные сияния, оптическое излучение тора Ио и декаметровое радиоизлучение, коррелирующее с Ио. В этой связи актуальна задача поиска новых возможностей для наземного мониторинга возмущений магнитосферы Юпитера его спутниками помимо Ио.

Указанная задача может быть решена средствами радиоастрономии. Декаметровое излучение Юпитера испытывает заметное рассеяние на неоднородностях магнитосферной плазмы, которые вытянуты вдоль силовых линий магнитного поля планеты. Вращение магнитосферы приводит к движению фазового экрана из этих неоднородностей на фоне радиоисточника. В результате возникает модуляция потока радиоизлучения на Земле, которая известна как модуляционные дорожки — дрейфующие квазипериодические полосы в динамическом спектре излучения (рис. 1). Поскольку магнитное поле Юпитера изучено достаточно хорошо, удастся вычислить зависимость скорости дрейфа дорожки по частоте от расстояния между радиоисточником и магнитосферной неоднородностью-волоконном. При измеренном дрейфе и известном положении радиоисточника можно локализовать волокно в пространстве.

Описанный подход известен как метод модуляционных дорожек. Он с успехом применялся для изучения нижней магнитосферы Юпитера [2] и структуры тора Ио [3]. Целью данного исследования является применение метода модуляционных дорожек к другим областям юпитерианской магнитосферы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С помощью модуляционных дорожек можно изучать расположение магнитосферных неоднородностей в пространстве и судить о наличии возмущений, вызванных спутниками Юпитера.

Место расположения магнитосферных неоднородностей на прямой радиоисточник — Земля может быть вычислено по скорости частотного дрейфа модуляционной дорожки. Суть этого алгоритма (DL [1, 2]) 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 [12] с учетом магнитодиска [11]) путем проецирования на картинную плоскость силовых линий, соответствующих источнику декаметрового излучения Юпитера и магнитосферной неоднородности (рис. 2). Для двух моментов времени ($t_1 = t - dt/2$, $t_2 = t + dt/2$) численно находятся точки проекции неоднородности на активную силовую линию (АЛ), где генерируется излучение соответственно на частотах f_1 и f_2 , которые принято считать близкими к локальным циклотронным частотам электронов [25]. Скорость дрейфа дорожки df/dt оценивается как отношение сдвиги этой частоты $\Delta f = f_2 - f_1$ к интервалу времени $\Delta t = t_2 - t_1$.

Этим способом для каждой модуляционной дорожки можно вычислить координаты точки, где излучение пересекает магнитосферную неоднородность. Таковыми координатами являются: $X_p = X_{ps}$, $Y_p = Y_{ps}$ в картинной плоскости и $Z_p = Z_{ps} + D$ на луче зрения, где X_{ps} , Y_{ps} , Z_{ps} — координаты источника излучения 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 [1]. Там же рассмотрен вопрос о локализации источников декаметрового излучения Юпитера.

Наиболее часто модуляционные дорожки тора наблюдаются на фоне радиобурь, четко коррелирующих с положением Ио на орбите относительно наблюдателя [23]. В этом случае радиоизлучение можно связать с магнитной силовой линией, пересекающей эффективное положение Ио (рис. 2). Разность долгот эффективного и истинного положений спутника $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ поддается оценке методом модуляционных дорожек (алгоритм OPER [1]), 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 D от него до магнитосферной неоднородности, можно локализовать и эффективный центр области формирования дорожки.

Расчеты такого рода были выполнены в работах [1–3] на основе динамических спектров декаметрового излучения Юпитера, опубликован-

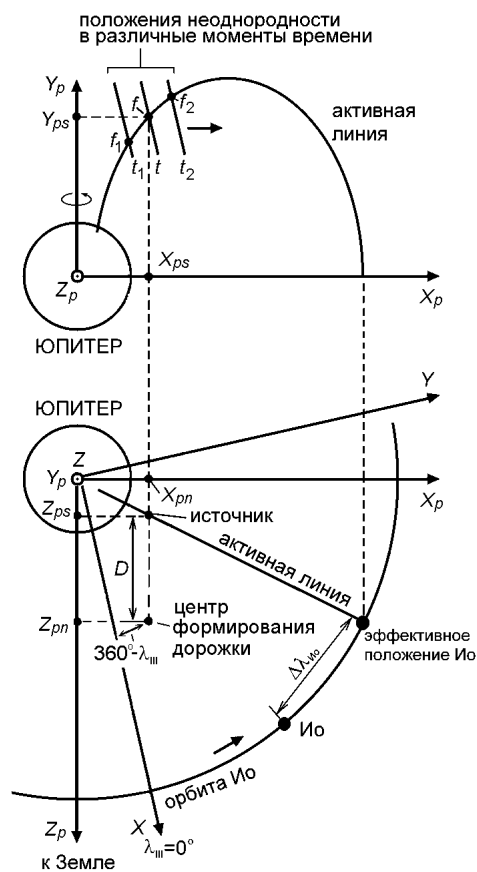


Рис. 2. Схема формирования модуляционной дорожки в картинной плоскости (вверху) и в экваториальной плоскости Юпитера (внизу)

ных Й. Й. Риихимаа [23]. Теперь же для анализа привлекается более свежий экспериментальный материал радиобсерватории Флоридского университета (UFRO) [14, 17] с целью поиска возмущений магнитосферы Юпитера его спутниками.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБНАРУЖИМЫХ ФЕНОМЕНОВ

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть ожидаемые свойства таких магнитосферных возмущений, которые могли бы формировать модуляционные дорожки, доступные для наблюдений. Локальные флуктуации δN_e электронной концентрации в магнитосфере Юпитера сдвигают фазу декаметрового излучения на величину $\delta\varphi$. Чтобы такое изменение проявилось в виде модуляционной дорожки, первая зона Френеля излучения в области возмущения должна быть существенно деформированной. Это достигается при $\delta\varphi \sim 1$ рад (так как радиус зоны Френеля определяется изменением фазы излучения на π). Дополнительный набег фазы в неоднородности-волокне с минимальным для обнаружения френелевским поперечником $d \sim 2(\lambda D)^{1/2}$ составляет

$$\Delta\varphi = 2\pi(n - n_o)d/(\lambda\sin\beta), \quad (1)$$

где n — показатель преломления волокна, n_o — средний показатель преломления среды, λ — длина волны излучения, D — расстояние от радиоисточника до волокна, β — угол наклона волокна к траектории излучения.

На орбите Ио циклотронная частота электронов ($f_c \approx 0.06$ МГц) и плазменная частота ($f_p \approx 0.3$ МГц при $N_e \sim 10^3$ см $^{-3}$ [5]) много меньше частоты наблюдаемого декаметрового излучения ($f \approx 20$ МГц). Поэтому и для более далеких спутников показатель преломления можно вычислять в высокочастотном приближении: $n \approx 1 - f_p^2/(2f^2)$ [4, с.124], где $f_p^2 = \kappa N_e$, $\kappa = 8.06 \cdot 10^{-5}$ МГц 2 см 3 . Тогда $n - n_o = \kappa\delta N_e/(2f^2)$.

Дисперсию фазы волны $\sigma_\varphi^2 = \langle(\delta\varphi)^2\rangle$ в дальней зоне можно оценить как сумму дисперсий фазы в отдельных, независимых слоях-волокнах вдоль траектории луча:

$$\sigma_\varphi^2 = \sum_{i=1}^N \langle\Delta\varphi_i^2\rangle \approx (\pi\kappa d/\lambda\sin\beta f^2)^2 \sigma_{N_e}^2 N, \quad (2)$$

где N — число независимых слоев на пути излучения, $\sigma_{N_e}^2$ — дисперсия электронной концентрации в таких слоях.

Тогда минимальную толщину ΔZ возмущенной области магнитосферы, которая может быть обнаружена методом модуляционных дорожек, можно найти из (2) при учете того, что доступные для наблюдения дорожки формируются при $\sigma_\varphi \sim 1$ рад, а луч излучения пересекает $N = \Delta Z \sin\beta/d$ слоев:

$$\Delta Z \sim 2\sin\beta\lambda^{3/2}f^4/[(\pi\kappa\sigma_{N_e})^2D^{1/2}], \quad (3)$$

где β и D вычислялись для конкретных радиоисточников с помощью алгоритма DRIFT [1]. Оценки ΔZ делались для различных значений σ_{N_e}/N_e , где N_e — средняя электронная концентрация в окрестностях орбиты спутника (для Амальтеи — 100 см $^{-3}$ [24], Ио — 2500 см $^{-3}$, Европы — 100 см $^{-3}$, Ганимеда — 3 см $^{-3}$, Каллисто — 0.1 см $^{-3}$ [16]). При этом интерес представляют такие значения σ_{N_e}/N_e , при которых ΔZ не превышает 20 % радиуса орбиты спутника (чтобы контраст модуляционных дорожек не

Таблица 1. Ожидаемые параметры модуляционных дорожек, сформированных на магнитных оболочках спутников Юпитера

Спутник	Радиус орбиты, км	Источник	df/dt , кГц/с	P_t , с	Минимальное σ_{Ne}/N_e
Амальтея	181000	Ио-А (север)	-36...-24	3.5...3.8	0.07
		Ио-В (север)	+38 ... +12	3.6...4.1	
		Ио-С (север)	-45 ... -8	3.6...4.4	
		Ио-С (юг)	-19 ... -7	3.9...4.3	
Ио	422000	Ио-А (север)	-95 ... -79	2.2...2.3	0.002
		Ио-В (север)	+75 ... +153	2.1...2.3	
		Ио-С (север)	-188 ... -99	2.1...2.2	
		Ио-С (юг)	-108 ... -83	2.2...2.3	
Европа	671000	Ио-А (север)	-161 ... -146	1.8	0.04
		Ио-В (север)	+154 ... +237	1.7...1.8	
		Ио-С (север)	-223 ... -167	1.7	
		Ио-С (юг)	-181 ... -150	1.7...1.8	
Ганимед	1070000	Ио-А (север)	-234 ... -230	1.4	0.8
		Ио-В (север)	+258 ... +307	1.4	
		Ио-С (север)	—	—	
		Ио-С (юг)	-285 ... -255	1.4	
Каллисто	1880000	Ио-А (север)	-393 ... -367	1.1	11
		Ио-В (север)	+351 ... +559	1.0...1.1	
		Ио-С (север)	—	—	
		Ио-С (юг)	-496	1.0...1.2	

оказался слишком низким за счет различной ориентации магнитного поля внутри возмущения).

Оцененные таким образом минимальные значения σ_{Ne}/N_e приведены в табл. 1 наряду с ожидаемыми параметрами модуляционных дорожек. Все вычисления выполнены при $f = 20$ МГц. Положение радиоисточника задавалось таким, чтобы выполнялись условия, которые характерны для радиоизлучения, коррелирующего с положением спутника Ио:

- а) источник находится на магнитной оболочке Ио;
- б) в источнике частота излучения близка к локальной циклотронной частоте электронов ($f \approx f_c$);
- в) в источнике вектор магнитного поля направлен под углом 70° [1] к направлению на Землю.

Для зафиксированного таким образом положения радиоисточника с помощью алгоритма DRIFT [1] вычислены скорость дрейфа дорожек по частоте (df/dt) и характерный период следования дорожек по времени:

$$P_t = (P_j/\pi)(\lambda/D)^{1/2} \approx (P_j/\pi)(\lambda/R_s)^{1/2},$$

где $P_j = 35729.71$ с — период обращения Юпитера вокруг оси, R_s — радиус орбиты спутника. Под «источниками» в табл. 1 подразумевается тип радиобурь Юпитера согласно традиционной терминологии.

Из табл. 1 следует, что наиболее благоприятные условия формирования модуляционных дорожек выполняются на магнитной оболочке Ио, что подтверждается наблюдениями [3]. Из остальных ближайших к Юпитеру спутников для обнаружения дорожек наиболее благоприятна магнитная оболочка Европы. Затем следует Амальтея. В обоих случаях для формирования дорожек достаточны флуктуации электронной концентрации на несколько процентов. Однако на оболочке Ганимеда дорожки могли бы сформироваться только при крайне большой неоднородности распределения плазмы ($\sigma_{Ne}/N_e \sim 1$). Каллисто в данной модели не может иметь модуляционные дорожки, поскольку для этого требуются неоднородности, у которых концентрация электронов более чем на порядок превосходит фоновое значение N_e .

Что же касается дрейфов, то у дорожек Европы и Амальтеи они должны быть существенно иными, чем у Ио. Это позволяет выделять такие феномены на фоне многочисленных модуляционных дорожек тора Ио.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРУКТУРЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЮПИТЕРА

С 2004 г., после введения в эксплуатацию нового спектроанализатора FS200 Р. Флагга на Windward Community College Radio Observatory (WCCRO) и University of Florida Radio Observatory (UFRO), в интернете начата регулярная публикация динамических спектров модуляционных дорожек декаметрового излучения Юпитера [14, 17]. Разрешение таких спектров составляет 0.1 с по времени и 30 кГц по частоте в диапазоне 18—29 МГц, что достаточно для регистрации дорожек с предсказанными выше свойствами. До сих пор этот материал предлагалось использовать лишь для уточнения положения и диаграмм направленности радиоисточников Юпитера [18]. Однако после решения этой задачи он же может быть использован и для исследования структуры магнитосферы Юпитера.

С этой целью на спектрах 2004—2005 гг. были измерены положения и скорости частотного дрейфа 592 модуляционных дорожек. Большинство из них принадлежит тору Ио. Это обстоятельство используется для определения положения радиоисточников. Чаще всего дорожки формируются на магнитной оболочке наиболее плотной части тора, которая расположена вдоль орбиты Ио — источника плазмы [3, 19]. А источники излучения, зависящего от Ио, принято связывать с приполярными частями этой же оболочки. Существует и долготная связь радиоисточника с Ио, хотя их долготы несколько различаются на величину угла опережения $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ (см. выше). Поэтому задача локализации радиоисточника сводится к оценке $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ путем подбора его оптимального значения для согласования расчетного df/dt дорожек и наивероятнейшего значения измеренной скорости их дрейфа. Результаты такого подбора с помощью алгоритма OPER [1] приведены в табл. 2 для каждой радиобури. Полученные значения $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ хорошо согласуются с более ранними оценками по материалам Й. Й. Риихимаа [1, 2].

Оценки $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ из табл. 2 использованы в алгоритме DL для локализации областей формирования отдельных модуляционных дорожек. Результаты

Таблица 2. Оценки угла опережения по модуляционным дорожкам тора Ио

Дата	Время* УТ	f^* , МГц	df/dt^* , кГц/с	Источник	Полярность	$\Delta\lambda_{\text{Ио}}$, град	Источник
14.01.2004	9:32	21.1	-91.1	Io-C	юг	30	[14]
04.02.2004	8:58	20.7	-106.7	Io-A	север	39	[14]
06.02.2004	10:13	19.6	-77.7	Io-A	север	11	[14]
15.02.2004	5:52	20.2	-102.8	Io-C	юг	52	[14]
16.02.2004	6:14	20.5	113.3	Io-B	север	34	[14]
22.02.2004	4:45	21.1	-97.8	Io-A	север	50	[14]
23.02.2004	7:16	20.2	102.2	Io-B	север	35	[14]
29.02.2004	5:2	21.2	-108.4	Io-A	север	28	[14]
25.03.2004	3:13	20.7	-93.4	Io-C	юг	44	[14]
26.03.2004	3:26	21.1	117.2	Io-B	север	39	[14]
02.04.2004	2:43	19.6	117.3	Io-B	север	57	[14]
09.01.2005	8:36	20.1	-111.3	Io-A	север	5	[17]
17.01.2005	13:13	23.3	190.4	Io-B	север	56	[17]
10.02.2005	7:13	21.1	-95.1	Io-C	юг	43	[17]

* — среднее значение для радиобури

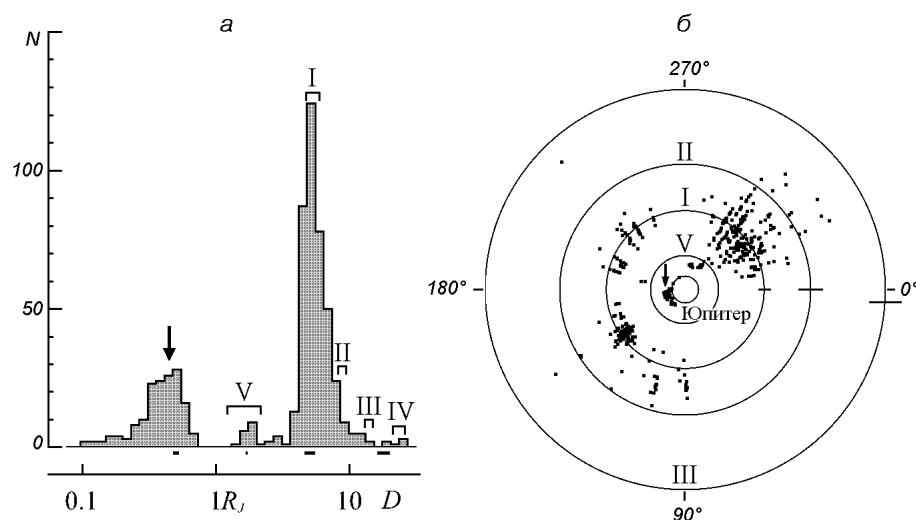


Рис. 3. Пространственные распределения центров формирования модуляционных дорожек: *a* — по расстоянию D от радиисточника (N — число дорожек, R_J — экваториальный радиус Юпитера), *б* — в проекции на экваториальную плоскость Юпитера. Указаны долготы λ_{III} и орбиты спутников (I — Ио, II — Европа, III — Ганимед, IV — Каллисто, V — Амальтея). Стрелки указывают дорожки нижней магнитосферы Юпитера. Горизонтальные полосы показывают неопределенность локализации при ошибке измерения $df/dt \pm 10\%$.

представлены на рис. 3, *a* в виде гистограммы значений расстояния источник — неоднородность (т. е. D). Хорошо видно, что кроме главного максимума, соответствующего тору Ио, модуляционные дорожки замечены и в окрестностях орбит других спутников. При этом дорожки Европы образуют шлейф пика дорожек Ио, что подтверждает аналогичный результат, полученный ранее по спектрам Й. Й. Риихимаа [3].

На рис. 3, *б* представлено двумерное распределение дорожек. По радиусу отложена дистанция области формирования дорожки от центра планеты. Долготы λ_{III} представлены в III (1965) системе вращения планеты, относительно магнитного поля Юпитера. Как и следовало ожидать, большинство точек концентрируется вокруг орбиты Ио, изображая плазменный тор. Дисперсия этих точек позволяет судить об ошибках индивидуальных оценок, которые сильно разнятся на разных долготах. Так измерения дрейфа коротких дорожек Ио на фоне узкополосного излучения Ио-С ($\lambda_{III} \approx 320^\circ$) наименее точны и могут приводить к появлению ложных дорожек Европы. Однако на фоне бури Ио-В ($\lambda_{III} \approx 140^\circ$) дисперсия точек вокруг орбиты Ио гораздо меньше, и все же отмечено несколько дорожек, сформированных в зоне Европы. Хотя этот результат недостаточно убедителен, он свидетельствует о необходимости дальнейших исследований на основе более обширного экспериментального материала.

Вопреки ожиданиям, отдельные дорожки формируются в зонах Ганимеда и даже Каллисто. Это требует повышения среднего N_e в несколько раз по сравнению со значениями, принятыми при расчетах выше (3 см^{-3} для Ганимеда и 0.1 см^{-3} для Каллисто). Такие временные вариации N_e вполне возможны ввиду флуктуаций электронной концентрации на 1-2 порядка в плазмосферах Земли [6] и Юпитера [8].

Небольшой, но четкий пик на рис. 3, *a* расположен как раз на дистанции магнитной оболочки Амальтеи. Это интересный результат, поскольку Амальтея слишком мала ($270 \times 165 \times 150 \text{ км}$) для формирования

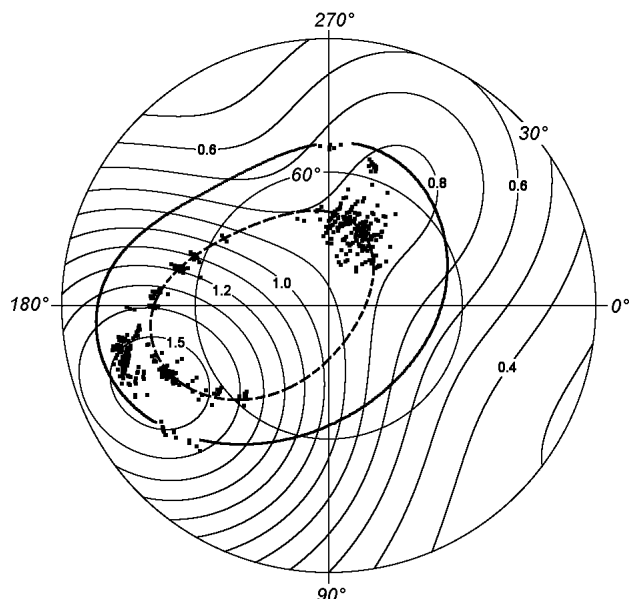


Рис. 4. Основания магнитных линий центров формирования модуляционных дорожек (точки) в основании северной ионосферы Юпитера. Указаны юпитерографические долготы (λ_{III}) и широты, индукция магнитного поля (тонкие линии, мТл), магнитные проекции орбит Ио (штриховая) и Амальтеи (полуэллипс)

плазменного тора вокруг ее орбиты за счет вулканических выбросов, как в случае Ио. Однако имеется другая возможность — возгонка льдов спутника, как у Европы. Хотя долгое время считалось, что Амальтея льды не содержит, пролет космической станции «Галилео» 05.11.2002 г. на расстоянии 244 км от спутника неожиданно выявил его низкую плотность ($857 \pm 99 \text{ кг/м}^3$). Этот факт был истолкован как доказательство значительного вклада водяного льда в массу Амальтеи [7]. И обнаружение плазменного тора Амальтеи методом модуляционных дорожек является новым доводом в пользу ледяной природы спутника.

Следует отметить, что в пространственном распределении дециметрового (синхротронного) излучения радиационного пояса Юпитера замечена четкая аномалия именно на магнитной оболочке Амальтеи [13]. Эта аномалия рассматривается как аргумент в пользу наличия альвеновских возмущений или плазменных волн, которые генерируются спутником и приводят к изотропизации электронов по питч-углам. Такие процессы благоприятны и для образования магнитосферных неоднородностей.

Формирование модуляционных дорожек в области орбиты Амальтеи не вызывает сомнений. На динамическом спектре декаметрового излучения Юпитера (рис. 1) четко видны как дорожки тора Ио, так и Амальтеи. Последние обладают аномально низкой скоростью дрейфа по частоте ($df/dt \sim -10 \text{ кГц/с}$) и образовались на магнитных линиях, которые пересекают экваториальную плоскость Юпитера на удалении 2.8—3 радиуса планеты от ее центра. Это соответствует радиусу орбиты Амальтеи (рис. 4). Заметим, что дорожки нижней магнитосферы Юпитера формируются ближе к радиоисточнику (рис. 3) и имели бы обратный знак дрейфа.

Интересно, что впервые дорожки Амальтеи были описаны еще в 1981 г. как «высокочастотные дорожки» (*hf-lanes* [15]). Однако их природа не была тогда понята. Теперь же можно дать простое объяснение отсутствию таких дорожек на низких частотах. Магнитная оболочка, возмущенная Амальтеей, располагается в ограниченном интервале широт и проецируется только на низкоширотные, соответственно высокочастотные радиоисточники.

Модуляционные дорожки Амальтеи отмечены лишь на определенных долготах $123^\circ \leq \lambda_{III} \leq 140^\circ$ и $284^\circ \leq \lambda_{III} \leq 305^\circ$. Это долготы областей формирования дорожек, и они немного отличаются от долгот северных

оснований соответствующих магнитных линий на рис. 4. Интересно, что это те самые долготы, где магнитное поле Юпитера максимально уплотняет магнитосферную плазму. Действительно, после ионизации материала Амальтеи свежая плазма продолжает двигаться с орбитальной скоростью V относительно магнитного поля с индукцией B . Как и в торе Ио [9], в таком движущемся проводнике, в направлении от Юпитера течет электрический ток, пропорциональный векторному произведению $[\mathbf{VB}]$. Магнитное поле действует на этот ток с силой Лоренца $F \propto [[\mathbf{VB}]\mathbf{B}]$, ускоряя плазму до коротации с магнитным полем. В системе юпитерографических координат, коротающей с магнитным полем планеты, сила Лоренца направлена приблизительно против V , и состоит в основном из азимутальной составляющей $F_\lambda \propto B^2$. При этом плотность плазмы увеличивается в областях положительного градиента $\partial F_\lambda / \partial \lambda_{III} > 0$. Численные расчеты по модели VIP4 [12] при типичной локализации радиоисточников ($f = 23.5$ МГц, $\psi = 70^\circ$) показывают, что максимальный градиент $\partial F_\lambda / \partial \lambda_{III} \propto \partial(B^2) / \partial \lambda$ на магнитной оболочке Амальтеи расположен на долготах $\lambda_{III} = 142^\circ$ (северные радиоисточники) и $\lambda_{III} = 301^\circ$ (южные радиоисточники). Эти расчетные долготы близки к долготам кластеров дорожек Амальтеи на рис. 4.

Попутно отметим, что на магнитной оболочке Ио плазма должна накапливаться на близких долготах (145° и 303°), что соответствует хорошо выраженным кластерам дорожек тора Ио на $\lambda_{III} \approx 140^\circ$ и $\lambda_{III} \approx 315^\circ$ (рис. 3, б).

Второй после тора Ио максимум гистограммы на рис. 3, а является результатом рассеяния декаметрового излучения в нижней магнитосфере Юпитера. Хорошо видно, что модуляционные дорожки формируются на удалении $D \sim 0.5R_J$ от радиоисточника и перестают формироваться на дистанциях менее $D_{\min} = 0.1R_J$. Это заметно ближе, чем считалось до сих пор ($0.17R_J$ [2]). Как было показано ранее [1—3, 19], дорожки — это результат интерференции декаметрового излучения на магнитосферных неоднородностях френелевского масштаба $d \sim 2(\lambda D)^{1/2}$. Дорожки замываются и перестают наблюдаться, когда d становится меньше размера S радиоисточника. Этот размер измеряется в направлении, перпендикулярном к магнитному полю. Отсюда следует новая оценка поперечной протяженности источника излучения: $S \sim 2(\lambda D_{\min})^{1/2} = 19$ км, где $\lambda = c/f = 12.8$ м вычислена для средней частоты использованных спектров $f = 23.5$ МГц.

Магнитные линии выявленных неоднородностей нижней магнитосферы пересекают северную ионосферу Юпитера в области аномалии с максимальной индукцией магнитного поля (рис. 4, долгота 160° , широта 42°). Это подтверждает результат, полученный ранее на основе других данных [2].

ВЫВОДЫ

Использование нового экспериментального материала позволило получить важные результаты о пространственном распределении областей возмущенной плазмы в магнитосфере Юпитера.

1. Обнаружены магнитосферные неоднородности на магнитной оболочке спутника Амальтея. Этот результат является новым доводом в пользу ледяной природы Амальтеи. Он подтверждает существование магнитосферной аномалии, связанной с этим спутником и замеченной также в дециметровом (синхротронном) излучении радиационного пояса Юпитера [13].

2. Магнитосферные возмущения на магнитных оболочках Амальтеи и Ио группируются вблизи тех долгот ($\lambda_{III} \approx 140^\circ$ и 300°), где следует ожидать максимального уплотнения плазмы магнитным полем Юпитера.

3. Обнаружены заметные магнитосферные возмущения в области орбит Ганимеда и Каллисто. Это свидетельствует о повышенной плотности плазмы там ($N_e \sim 10 \text{ см}^{-3}$ у Ганимеда и $N_e > 1 \text{ см}^{-3}$ у Каллисто) по сравнению с модельными значениями. По-видимому, плотность плазмы изменяется со временем на порядок или более, что характерно и для магнитосферы Земли.

4. Подтвержден прежний результат о формировании модуляционных дорожек в области орбиты Европы.

5. Подтверждена связь области возмущения нижней магнитосферы с магнитной аномалией в северном полушарии Юпитера.

6. Уточнена локализация источников декаметрового излучения Юпитера, связанных с Ио. Получены новые оценки угла опережения радиоисточников ($5^\circ < \Delta\lambda_{\text{Ио}} < 57^\circ$, в среднем $\Delta\lambda_{\text{Ио}} = 37^\circ$), которые согласуются с прежними результатами (39° [1, 2]).

7. Установлено, что модуляционные дорожки перестают формироваться на меньших расстояниях от радиоисточника ($0.1R_J$), чем считалось ранее. Это позволяет уменьшить оценку поперечника области генерации излучения до 20 км.

Полученные результаты актуальны в связи с проектом НАСА Jupiter Tour по посылке зонда для исследований ледяных спутников Юпитера. С другой стороны, использованная техника может применяться для дистанционного мониторинга магнитосферы Юпитера радиоастрономическими средствами.

1. Архипов А. В. О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: радиоисточники // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 5.—С. 387—396.
2. Архипов А. В. О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: нижняя магнитосфера // Кинематика и физика небес. тел.—2004.—20, № 4.—С. 349—358.
3. Архипов А. В. О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: тор Ио // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—21, № 1.—С. 39—48.
4. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. — М.: Наука, 1984.—С. 276—281.
5. Салливан Дж. Д., Сиско Дж. Л. Наблюдения плазменного тора Ио // Спутники Юпитера. — М.: Мир, 1986.—Т. 3.—С. 238—263.
6. Солнечная и солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1980.—190 с.
7. Anderson J. D., Johnson T. V., Schubert G., et al. Amalthea's density is less than that of water // Science.—2005.—308, N 5726.—P. 1291—1293.
8. Belcher J. W. low-energy plasma in the jovian magnetosphere // Physics of the Jovian Magnetosphere / Ed. A. J. Dessler. — N. Y.: Cambridge Univ. Press, 1983.—P. 68—105.
9. Belcher J. W. The Jupiter-Io connection: an Alfvén engine in space // Science.—1987.—238, N 4824.—P. 170—176.
10. Clarke J. T., Ajello J., Ballester G., et al. Ultraviolet emissions from the magnetic footprints of Io, Ganymede and Europa on Jupiter // Nature.—2002.—415, N 6875.—P. 997—1000.
11. Connerney J. E. P., Acuna M. H., Ness N. F. Modeling the Jovian current sheet and inner magnetosphere // J. Geophys. Res.—1981.—86, N A10.—P. 8370—8384.
12. 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.
13. De Pater I., Schulz M., Brecht S. H. Synchrotron evidence for Amalthea's influence on Jupiter's electron radiation belt // J. Geophys. Res.—1997.—102, N A10.—P. 22043—22064.
14. Flagg R. Radio JOVE data archive display. — 2004.—<http://jovearchive.gsfc.nasa.gov/>
15. Genova F., Aubier M. 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.
16. Gurnett D. A., Scarf F. L., Kurth W. S., et al. Determination of Jupiter's electron density profile from plasma wave observations // J. Geophys. Res.—1981.—86, N A10.—P. 8199—8212.
17. Imai K., Flagg R. UFRO spectrograph data archive.—2005.—<http://jupiter.kochi-ct.jp/spectrograph/>

18. *Imai K., Imai M., Reyes F., et al.* The Internet Jupiter radio observatory and modulation lanes observed by the new UFRO jove spectrograph // 6th International Workshop on Planetary and Solar Radio Emissions. Graz, Austria, April 20—22, 2005. Abstracts (<http://pre6.oeaw.ac.at/viewabstract.php?ID=49>)
19. *Imai K., Wang L., Carr T. D.* Modeling Jupiter's decametric modulation lanes // *J. Geophys. Res.*—1997.—**102**, N A4.—P. 7127—7136.
20. *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.
21. *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.
22. *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.
23. *Riihimaa J. J.* Modulation lanes revisited. — Oulu: Univ. Oulu, 1993.—92 p.
24. *Sentman D. D., Goertz C. K.* Whistler mode noise in Jupiter's inner magnetosphere // *J. Geophys. Res.*—1978.—**83**, N A7.—P. 3151—3165.
25. *Zarka P.* Auroral radio emission at the outer planets: observations and theories // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N E9.—P. 20159—20194.

Поступила в редакцию 09.03.06