

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: радиоисточники**

*Модуляционные дорожки декаметрового радиоизлучения Юпитера формируются рассеянием излучения на неоднородностях магнитосферы этой планеты, вытянутых вдоль магнитного поля. Новый алгоритм вычисления модуляционных дорожек использован для изучения расположения, диаграммы направленности и размера юпитерианских радиоисточников.*

*ПРО МОДУЛЯЦІЙНІ ДОРІЖКИ У СПЕКТРІ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА: РАДІОДЖЕРЕЛА, Архипов О. В. — Модуляційні доріжки декаметрового радіовипромінювання Юпітера формуються розсіянням на неоднорідностях магнетосфери планети, витягнутих уздовж магнітного поля. Новий алгоритм обчислення модуляційних доріжок застосовано для вивчення розташування, діаграми спрямованості та розміру юпітеріанських радіоджерел.*

*ON MODULATION LANES IN SPECTRA OF JOVIAN DECAMETRIC RADIO EMISSION: RADIO SOURCES, by Arkhipov A. V. — Modulation lanes in spectra of the Jovian decametric radio emission are formed by a scattering on field-aligned inhomogeneities in the magnetosphere of the planet. A new algorithm for calculating modulation lanes is used to study locations, radiation patterns and sizes of Jovian radio sources.*

#### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Изучение декаметрового излучения Юпитера (ДИЮ) играет важную роль в понимании нетеплового, низкочастотного радиоизлучения магнитосфер планет. Однако до сих пор не решен ряд ключевых проблем радиоастрономии Юпитера.

1. Нет ясности в вопросе о локализации источников ДИЮ, зависящего от положения спутника Ио, особенно L-всплесков, длящихся порядка 1 с на фиксированной частоте. Общепринято, что в данном случае источник находится на магнитной линии, пересекающей орбиту Ио [17]. Однако нет единства в оценке разности долгот  $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$  этого пересечения и положения самого Ио, именуемой углом опережения. Даже для одного и того же

источника Ио-В есть большие расхождения оценок этой разности:  $20^\circ$  [16],  $40^\circ$  [13],  $50^\circ$  [10, 12],  $70^\circ$  [6].

2. Неясна локализация источников ДИЮ, независящего от Ио (Не-Ио). Так генерация этого излучения предполагалась на самых разных магнитных силовых линиях: заключенных внутри орбиты Ио [8], пересекающих эту орбиту [10], и проходящих вне ее [17]. По сути неизвестно также, на каких именно долготах генерируется излучение Не-Ио.

3. Недостаточно хорошо известно, под какими углами  $\psi$  к магнитному полю в источнике излучается ДИЮ. Даже для близких частот ( $f \approx 22$  МГц) одного и того же типа излучения (L-всплески, Ио-В) оценки расходятся от  $\psi = 60^\circ$  [12] до  $\psi = 80^\circ$  [8].

4. Неизвестен размер области генерации L-излучения. Прямые РСДБ-измерения показали, что источник не превышает 400 км [4]. Верхний предел был понижен К. Имаи и др. [11, 12] до 70 км и предположительно даже до 20 км.

Для решения перечисленных задач в работах [9–12] применялся анализ модуляционных дорожек (modulation lanes) в спектрах ДИЮ. Ввиду неустоявшейся терминологии в русскоязычной литературе, здесь используется наиболее корректный перевод англоязычного термина lanes согласно [1]. Развитию анализа модуляционных дорожек и посвящена данная статья. Ниже сделаны новые оценки  $\Delta\lambda_{\text{Ио}}$ ,  $\psi$  и размера источника L-всплесков ДИЮ.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модуляционными дорожками принято называть дрейфующие по частоте детали динамического спектра декаметрового радиоизлучения Юпитера, которые имеют вид квазипериодической последовательности наклоненных ярких и темных полос, заметных только на фоне радиобурь планеты. На фиксированной частоте характерный период модуляции составляет 2–10 с, а глубина — несколько децибел [7]. Скорость дрейфа дорожек может быть как положительной, так и отрицательной, составляя по модулю от 10 до 300 кГц/с, обычно увеличиваясь с частотой [14].

К. Имаи и др. [9–12] убедительно показали, что большинство модуляционных дорожек объясняется прохождением излучения через неоднородности магнитосферной плазмы в торе Ио. Как известно, вулканы Ио формируют тор относительно плотной плазмы, окружающий орбиту этого спутника и коротящий с магнитным полем Юпитера. Неоднородности тора вытянуты вдоль магнитного поля и движутся на фоне источника декаметрового радиоизлучения. Этот источник также вытянут вдоль активной

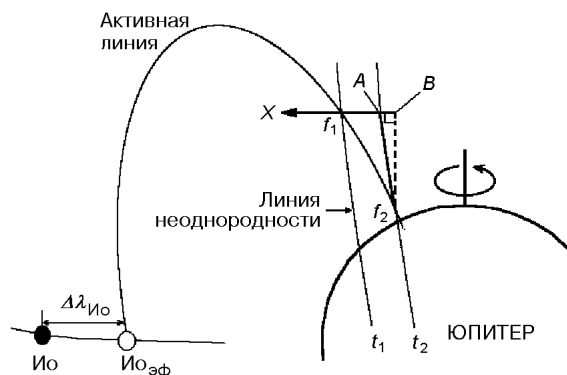


Рис. 1. Схема формирования модуляционных дорожек ДИЮ (вид с Земли). Показаны положения одной и той же неоднородности магнитосферы Юпитера, вытянутой вдоль магнитного поля, в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ . При этом линза-неоднородность последовательно проецируется на две разные точки активной линии, которые излучают частоты  $f_1$  и  $f_2$

магнитной силовой линии. Разные его точки излучают на разных частотах, которые принято считать близкими к локальным циклотронным частотам электронов  $f_c$  [9—13, 16, 17] (рис. 1). В результате движущаяся неоднородность изменяет принимаемый поток радиоизлучения (преломление, интерференция) и формирует полосу в динамическом спектре, дрейфующую по частоте.

Следовательно, модуляционные дорожки содержат ценную информацию о положении и размерах источников ДИЮ. В работах [9—12] предпринята попытка извлечь эти сведения. Однако их анализ основан на упрощенном алгоритме вычисления скорости частотного дрейфа дорожек, не учитывающем кривизну и наклон к экватору магнитных силовых линий в торе Ио. На активной магнитной линии (далее АЛ) они находили положение источника для двух частот ( $f_1, f_2$ ) в проекции на картинную плоскость относительно оси  $X$ , которая направлена перпендикулярно к лучу зрения и к оси вращения Юпитера. При этом скорость частотного дрейфа дорожки оценивалась по формуле

$$df/dt = -(v_c - v_s)(f_2 - f_1)/(X_2 - X_1), \quad (1)$$

где  $v_c$  и  $v_s$  — скорости смещения по оси  $X$  соответственно неоднородности тора Ио и источника;  $X_1$  и  $X_2$  — координаты точек АЛ, излучающих на частотах  $f_1, f_2$ . На рис. 1 разность  $X_2 - X_1$  соответствует отрезку  $f_1B$ . Он заметно отличается от реального смещения ( $f_1A$ ) неоднородности вдоль оси  $X$ . Возникающая при этом ошибка оценок  $t_2 - t_1$ , и соответственно  $df/dt$ , иногда превышает 100 %. Например, для источника Ио-В при долготе центрального меридиана Юпитера  $\lambda = 90^\circ$  и «типичном» угле  $\psi = 60^\circ$ , упрощенный алгоритм оценивает скорость дрейфа дорожек по частоте:  $df/dt = 180$  кГц/с [12, рис. 6, а]. А согласно более точному алгоритму (см. п. 2),  $df/dt = 371.6$  кГц/с. Поэтому результаты работ [9—12] нуждаются в ревизии.

Задачей этой статьи является новый анализ имеющихся данных о модуляционных дорожках [14], выполненный на основе более корректного алгоритма расчета  $df/dt$  и при использовании новейшей модели магнитного поля Юпитера VIP-4 [5] (работы [9—12] основаны на устаревшей модели  $O_4$ ).

### 3. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Для вычисления модельных скоростей дрейфа модуляционных дорожек по частоте автором создана оригинальная компьютерная процедура DRIFT, более точная, чем алгоритм в [9—12]. Ее суть заключается в проекции магнитных силовых линий на картинную плоскость и в численном решении задачи нахождения точки пересечения этих проекций (рис. 2). Хотя здесь неоднородности плазменного тора распределены вдоль орбиты Ио, в алгоритмах LOCAT и DL юпитероцентрическое расстояние неоднородностей  $R_s$  считается свободным параметром.

Для нужного момента времени  $t$  и частоты  $f$  находится положение источника ( $X_{ps}, Y_{ps}, Z_{ps}$ ) на активной силовой линии магнитного поля (АЛ) в правой декартовой системе координат  $X_p, Y_p, Z_p$ . Центр системы отсчета помещен в центр Юпитера; ось  $Z_p$  направлена на Землю; оси  $X_p$  и  $Y_p$  лежат в картинной плоскости и направлены параллельно экватору и оси вращения Юпитера соответственно. Тогда можно задать координаты опорной точки магнитосферной неоднородности, проецирующейся на источник:  $X_{pn} = X_{ps}$ ,  $Y_{pn} = Y_{ps}$ ,  $Z_{pn} = Z_{ps} + D$ , где  $D$  — расстояние от источника до неоднороднос-

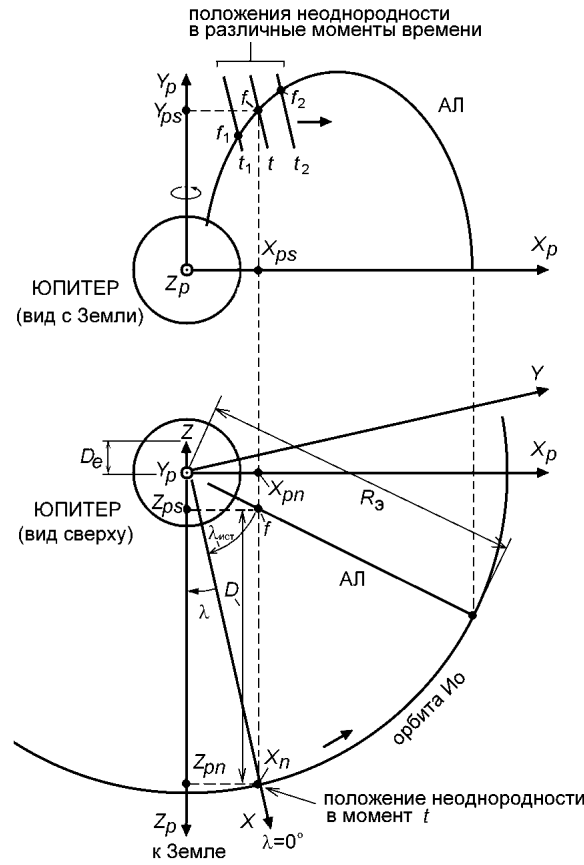


Рис. 2. Схема обозначений и систем координат, используемых при вычислении скорости частотного дрейфа модуляционных дорожек с помощью алгоритма DRIFT

ти. С помощью матрицы поворота осуществляется переход в систему координат, совращающуюся с магнитным полем Юпитера (ось  $Z$  направлена вдоль оси вращения Юпитера; оси  $X$ ,  $Y$  лежат в плоскости экватора планеты, причем ось  $X$  направлена на нулевой меридиан в системе вращения П1965):

$$X_n = X_{pn} \sin \lambda - Y_{pn} \cos \lambda \sin D_e + Z_{pn} \cos \lambda \cos D_e, \quad (2)$$

$$Y_n = X_{pn} \cos \lambda + Y_{pn} \sin \lambda \sin D_e - Z_{pn} \sin \lambda \cos D_e, \quad (3)$$

$$Z_n = Y_{pn} \cos D_e + Z_{pn} \sin D_e, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — долгота центрального меридиана Юпитера в системе вращения П1965,  $D_e$  — юпитероцентрическое склонение Земли (эти величины либо задаются, либо вычисляются на момент наблюдений согласно [2]). В этой системе координат прослеживаются магнитные силовые линии, определяющие АЛ и неоднородность плазмы, вытянутую вдоль магнитного поля. Переходы от одной системы координат к другой и обратно позволяют вычислять тангенциальные (видимые) координаты точек АЛ и неоднородности плазмы для моментов времени  $t_1 = t - \Delta t$  и  $t_2 = t + \Delta t$ . Для места проекции неоднородности на излучающую АЛ вычисляются частоты радиоизлучения  $f_1$  и  $f_2$  на моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно. Тогда скорость дрейфа есть  $df/dt = (f_2 - f_1)/(t_2 - t_1)$ . Погрешность оценки обычно не превышает 1 %.

Описанная процедура DRIFT используется в пакете численных алгоритмов, решающих следующие задачи.

1. Трехмерная локализация области генерации ДИЮ (алгоритм LOCAT). АЛ можно однозначно задать такими параметрами: долготой  $\lambda_{\text{ист}}$  источника излучения с частотой  $f$  и юпитероцентрическим расстоянием  $R_s$  пересечения АЛ с экваториальной плоскостью Юпитера (рис. 2). Близкая к параметру Мак-Илвейна, величина  $R_s$  позволяет судить о связи радиоисточника с Ио или тором Ио, для которых  $R_s \approx 5.9061 R_J$ , где  $R_J = 71372$  км — экваториальный радиус Юпитера. Задача решается путем простого перебора магнитных силовых линий. На каждой линии находится пара точек, в которых циклотронные частоты электронов  $f_{c1}, f_{c2}$  близки к двум заданным частотам излучения  $f_1, f_2$ . Это стандартное приближение позволяет вычислить  $(df/dt)_1$  и  $(df/dt)_2$  модуляционных дорожек для  $f_1$  и  $f_2$ . Нахождение АЛ сводится к поиску минимальной суммы квадратов отклонений расчетных  $df/dt$  от наблюдаемых дрейфов. Формальная точность локализации АЛ на картинной плоскости не хуже  $0.002R_J$ .

2. Локализация области генерации ДИЮ только по долготе (алгоритм OPER). В случае ДИЮ зависящего от Ио, параметр  $R_s$  равен радиусу орбиты этого спутника. Поэтому достаточно лишь на одной частоте варьировать только долготу источника:  $\lambda_{\text{ист}} = \lambda_{\text{ио}} - \Delta\lambda_{\text{ио}}$ . Поскольку долгота Ио  $\lambda_{\text{ио}}$  вычисляется на момент времени наблюдений, свободным параметром является угол опережения  $\Delta\lambda_{\text{ио}}$ . Методом последовательных приближений  $\Delta\lambda_{\text{ио}}$  подбирается таким, чтобы расчетная  $df/dt$  модуляционных дорожек совпадала с наблюдаемой величиной с точностью не хуже 1 %.

3. Вычисление  $df/dt$  модуляционных дорожек в случае фиксированной долготы источника  $\lambda_{\text{ист}} = -\arctg(Y_n/X_n) = \text{const}$ , но при наблюдении с произвольных направлений, задаваемых через  $\lambda$  и  $D_e$  (алгоритм MODULAM). Параметр  $R_s$  полагается равным среднему радиусу орбиты Ио (т. е.  $5.9061R_J$  [2]).

4. Вычисление  $df/dt$  модуляционных дорожек в случае фиксированного угла  $\psi$  (алгоритм MODUPSI). В этом случае приходится специально искать такую АЛ, которая обеспечивает заданную величину  $\psi$  при заданных  $f, \lambda, D_e$ . Это достигается методом последовательных приближений путем вариаций долготы точки пересечения магнитной линии с экваториальной плоскостью Юпитера. При этом по-прежнему  $R_s = 5.9061 R_J$ .

5. Вычисление расстояния источник—неоднородность по заданному  $df/dt$  дорожки (алгоритм DL). Используется метод последовательных приближений.

#### 4. ЛОКАЛИЗАЦИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Для определения положения в пространстве активных магнитных линий использованы результаты многолетних наблюдений модуляционных дорожек, выполненных Й. Й. Риихимаа на частотах 21—23 МГц [14]. Многочисленные экспериментальные оценки  $df/dt$  модуляционных дорожек опубликованы в виде:

а) графиков зависимости  $df/dt$  от  $f$ , построенных для излучения Ио-В [14, рис. 49—53];

б) распределений дорожек по плоскости  $df/dt - \lambda$ , построенных отдельно для зависимого и независимого компонентов ДИЮ [10, рис. 6].

Для нахождения положений источников с помощью алгоритма LOCAT удобно использовать средние дрейфы, измеренные на частотах 21 МГц и 29—31 МГц согласно графикам Й. Й. Риихимаа (а). Тогда для Ио-В по пяти парам оценок дрейфа было получено  $R_s = 6.3 \pm 1.3 R_J$ , что соответствует радиусу орбиты Ио. Угол опережения оценивается весьма приблизительно:

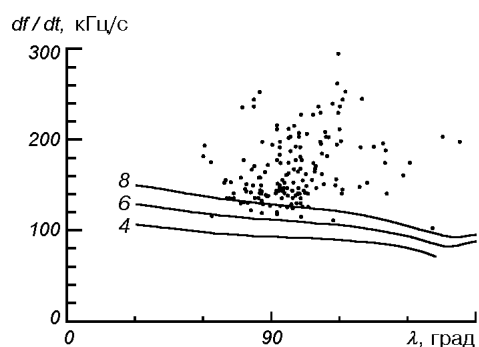


Рис. 3. Локализация источников излучения Не-Ио-В по  $R_3$  (аналог параметра Мак-Илвейна). Линии — минимальный дрейф, вычисленный с помощью алгоритма MODUPSI  $\psi = 90^\circ$ ;  $f = 22$  МГц;  $f \approx f_c$ ;  $D_e = 0^\circ$ ; север). Значения параметра  $R_3/R_1$  показаны цифрами у соответствующих кривых

$\Delta\lambda_{\text{Ио}} = 31^\circ \pm 14^\circ$ . Но используя средние дрейфы для всех частот (28 точек графиков для Ио-В [14, рис. 49—53]), с помощью алгоритма OPER получается более точный результат:  $\Delta\lambda_{\text{Ио}} = 38.7^\circ \pm 1.4^\circ$ . Эта оценка заметно меньше результата К. Имаи и др. [9, 10] ( $\Delta\lambda_{\text{Ио}} \approx 50^\circ$ ).

К сожалению, опубликован только один динамический спектр Не-Ио-излучения с модуляционными дорожками (29.10.1987; Не-Ио-А [14, рис. 37]). На этом спектре были измерены скорости дрейфа модуляционных дорожек, соответствующие средним частотам 21—21.8 МГц и 25.1—27.1 МГц. Обработка с помощью алгоритма LOCAT независимых пар оценок  $df/dt$  на двух разных частотах привели к следующим цифрам для северного излучения Не-Ио-А:  $R_3 = 7 \pm 1R_1$ ,  $\lambda_{\text{ист}} = 146^\circ \pm 7^\circ$  при  $f = 25.8 \pm 0.4$  МГц. Этот результат противоречит гипотезе о связи Не-Ио-излучения с овалом полярных сияний Юпитера (тогда было бы  $R_3 \approx 21R_1$  [15]). По-видимому, обсуждаемое излучение связано именно с тором Ио ( $R_3 \approx 6R_1$ ), а не с самим спутником, поскольку нет корреляции Не-Ио-бурь с орбитальной долготой Ио [1, 4].

Эта же связь подтверждается и на рис. 3 совпадением минимальных дрейфов модуляционных дорожек излучения Не-Ио-В [10, рис. 6] с теоретическим пределом  $df/dt$ , рассчитанным для  $R_3 = 6R_1$ ,  $f = 22$  МГц,  $D_e = 0^\circ$  и  $\psi = 90^\circ$  (случай  $\psi > 90^\circ$  соответствует затуханию ДИЮ как быстрой необыкновенной волны, распространяющейся в полосе задержки [3]).

Положение источников ДИЮ по долготе можно определить с помощью экспериментальных диаграмм  $df/dt - \lambda$  [10, рис. 6]. С этой целью на них впервые были нанесены семейства кривых  $\lambda_{\text{ист}} = \text{const}$  ( $\psi \leq 90^\circ$ ), рассчитанные по алгоритму MODULAM для северной части магнитосферы и средних параметров:  $R_3 = 5.91R_1$  (это радиус орбиты Ио);  $f = 22$  МГц;  $D_e = 0$ . Результат (рис. 4) свидетельствует о генерации излучения Не-Ио-В на долготах  $135^\circ < \lambda_{\text{ист}} < 190^\circ$  с максимумом вероятности наблюдения на  $\lambda_{\text{ист}} \approx 155^\circ$ .

Излучение Не-Ио-А фиксируется на долготах  $\lambda_{\text{ист}} \leq 210^\circ$  при наиболее вероятной величине  $\lambda_{\text{ист}} \approx 180^\circ$ . Соответственно, Ио-В излучение имеет место в секторе  $135^\circ < \lambda_{\text{ист}} < 200^\circ$  с максимумом вероятности наблюдения на  $\lambda_{\text{ист}} \approx 160^\circ$ , а Ио-А относится к сектору  $150^\circ < \lambda_{\text{ист}} < 285^\circ$  с максимумом вероятности излучения на  $\lambda_{\text{ист}} \approx 170^\circ$ . Из рис. 4, з следует, что кластер точек около  $\lambda \approx 300^\circ$  (Ио-С) объясняется простым сгущением линий  $\lambda_{\text{ист}} = \text{const}$  при долготах источников около  $230^\circ$ . Это сгущение отсутствует в случае кривых, вычисленных для южной полярной области.

Из сделанных оценок следует, что излучение А и В (как зависимое, так и не зависимое от Ио) чаще всего наблюдается при долготе  $\lambda_{\text{ист}} = 170^\circ \pm 10^\circ$ .

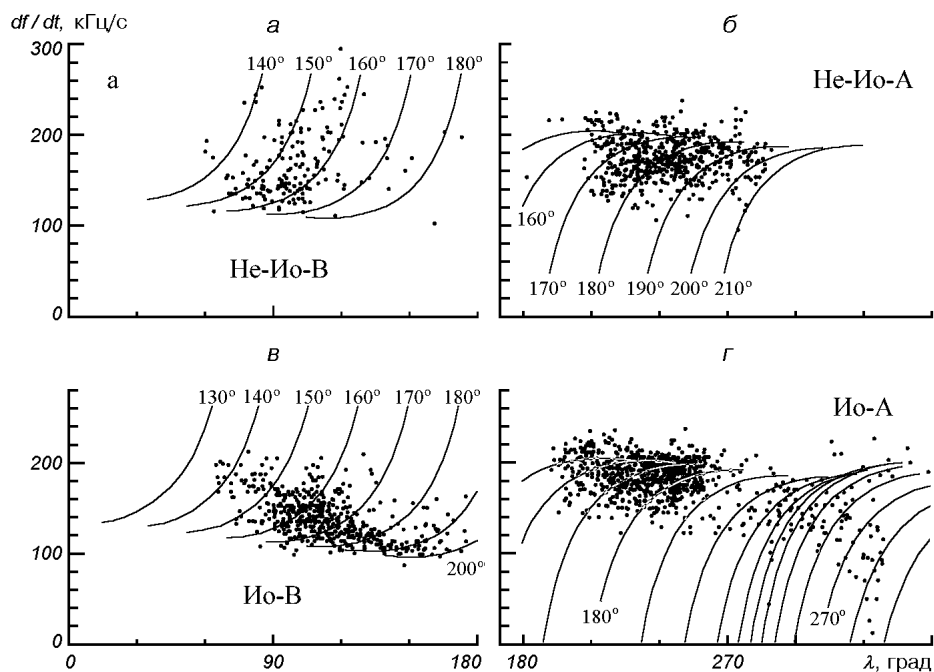


Рис. 4. Локализация источников ДИЮ по долготе с помощью линий  $\lambda_{\text{ист}} = \text{const}$ , вычисленных с интервалом  $10^\circ$  (алгоритм MODULAM). Кривые рассчитаны для северных источников при стандартном наборе параметров ( $R_0 = 5.91 R_J$ ;  $f \approx f_c = 22$  МГц;  $D_e = 0^\circ$ ) и  $\psi < 90^\circ$ . Величины  $\lambda_{\text{ист}}$  указаны у соответствующих кривых. Кластеры экспериментальных точек заимствованы из [10, рис. 6]. Форма кластеров Ио-А,В в большей степени определяется диаграммой направленности излучения и лучше соответствует кривым  $\psi = \text{const}$  (см. рис. 5). Излучение же Не-Ио-А,В теснее связано с активными долготами магнитосферы (так как по определению оно не зависит от Ио) и поэтому лучше коррелирует с линиями  $\lambda_{\text{ист}} = \text{const}$

Это согласуется со стандартной интерпретацией радиобурь А и В как пересечений двух стенок полого конуса одной диаграммы направленности.

##### 5. ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ

Оценки угла  $\psi$  раствора диаграммы направленности, получаемые в процессе выполнения алгоритма LOCAT (см. пп. 3, 4), слишком приблизительны. Так, для Ио-В по пяти парам средних точек с экстремальными частотами на графиках Й. Й. Риихимаа [14, рис. 49—53] получено  $\psi = 69^\circ \pm 9^\circ$  при  $f = 21$  МГц. Для Не-Ио-А по спектру 29.10.1987 [14, рис. 37] найдено  $\psi = 81^\circ \pm 8^\circ$  при  $f = 21$  МГц.

Более точные оценки удастся сделать путем нанесения на диаграммы  $df/dt - \lambda$  [10, рис. 6] семейств кривых  $\psi = \text{const}$  (рис. 5), вычисленных с помощью алгоритма MODUPSI. Хорошо видно согласие вычисленных кривых с очертаниями кластера Ио-В в случае северного источника, но для южных кривых корреляции нет. Северное происхождение Ио-В подтверждается и данными поляриметрии [1, 4]. В случае Ио-А,С расчетные кривые допускают наличие примеси южного излучения, что также подтверждается поляриметрией [1, 4].

Подсчет точек, заключенных между расчетными кривыми, дал следующие оценки средних величин  $\langle \psi \rangle$ , относящиеся к  $f = 22$  МГц:  $62.6^\circ \pm 0.4^\circ$

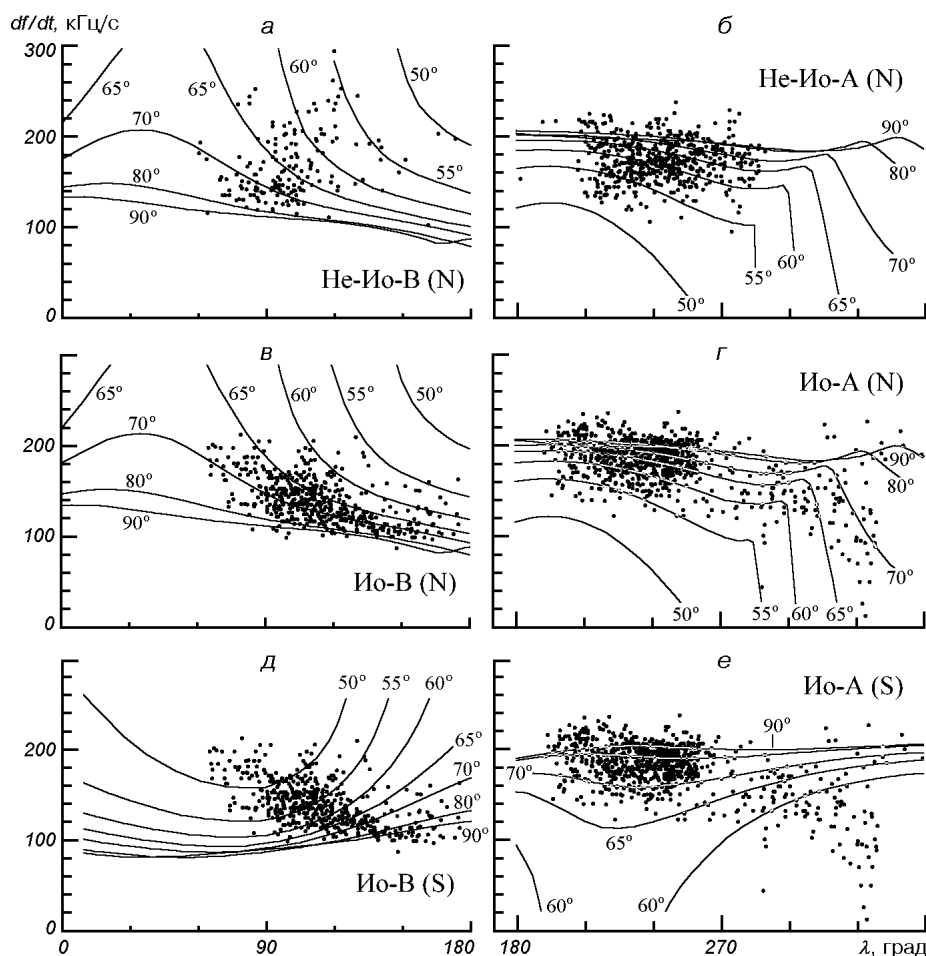


Рис. 5. Сопоставление расчетных кривых  $\psi = \text{const}$  с результатами измерений дрейфа модуляционных дорожек по данным работы [10]. Цифры у кривых обозначают величину угла  $\psi$  на севере или  $180^\circ - \psi$  на юге. Семейства кривых на диаграммах а—г рассчитаны для северного излучения. Кривые на диаграммах д—е соответствуют южному излучению. Они мало отличаются от аналогичных кривых для южного излучения He-Ио.

(He-Ио-А);  $65.4^\circ \pm 0.5^\circ$  (He-Ио-В);  $68.4^\circ \pm 0.3^\circ$  (Ио-В);  $67.8^\circ \pm 0.6^\circ$  (Ио-С;  $\lambda > 270^\circ$ ). В кластере Ио-А наложение точек друг на друга позволяет сделать лишь очень грубую оценку:  $\langle \psi \rangle \approx 70^\circ$ . Индивидуальные углы  $\psi$  иногда отличаются от средних значений на  $10\text{--}20^\circ$ . Их средние квадратичные отклонения составляют около  $7^\circ$ .

Близость значений  $\langle \psi \rangle$  для He-Ио-А и He-Ио-В излучений свидетельствует о симметрии диаграммы направленности излучения, не зависящего от Ио. Следует отметить, что оценки  $\langle \psi \rangle$ , сделанные в пределе  $f/f_c = 1$ , слабо зависят от параметра  $f/f_c$ . Расчеты для Ио-В показали, что при увеличении  $f/f_c$  до 1.2, угол  $\psi$  уменьшается всего на  $3^\circ$ .

## 6. РАЗМЕР ИСТОЧНИКА

Оценить монохроматический размер источника  $S$  можно по видимому расстоянию между неоднородностями магнитосферы  $d$ . Протяженность источника в пространстве сглаживает тени магнитосферных неоднородностей,



размывает модуляционные дорожки, делая их невидимыми при  $d < S$ . Границей видимости дорожек является условие  $d \sim S$ . Это критическое значение  $d_{\min}$  можно оценить по минимальному периоду  $P$  следования модуляционных дорожек на фиксированной частоте:  $d_{\min} = 2\pi DP/T$ , где  $T = 35729.71$  с — период вращения Юпитера вокруг оси.

Разумеется, величина  $d_{\min}$  ограничена снизу диаметром первой зоны Френеля:  $D_1 = 2(cD/f)^{1/2}$ , где  $c$  — скорость света;  $D$  — расстояние источник — неоднородность магнитосферы. Поэтому значения  $P$  измерялись по модуляционным дорожкам с  $D < 0.5R_J$ , которые формировались не в торе Ио, а в нижней магнитосфере Юпитера. При этом оценивать  $P$  доступней и надежней через период следования дорожек по частоте  $\Delta f$ :  $P = \Delta f(df/dt)^{-1}$ .

На динамических спектрах Ио-В из атласа Й. Й. Риихимаа [14] удалось обнаружить 14 групп модуляционных дорожек, пригодных для оценки  $d_{\min}$ . Для каждой группы измерялись  $t$ ,  $f$ ,  $\Delta f$ ,  $df/dt$ . С помощью алгоритма DL (см. п. 3) по этим данным и при  $\Delta\lambda_{\text{Ио}} = 39^\circ$  (см. п. 4) в приближении  $f/f_c = 1$  вычислялось  $D$  для северной полярной области Юпитера. Для уменьшения ошибок результаты измерений усреднены:  $P = 6.8 \pm 0.4$  с;  $D = 0.37 \pm 0.02R_J$ ;  $f = 22.0 \pm 0.5$  МГц. Отсюда следует:  $d_{\min} = 32 \pm 2$  км;  $D_1 = 38$  км. Следовательно,  $d_{\min}/D_1 = 0.83$ , и видимые размеры источника ДИЮ определяются первой зоной Френеля на фазовом экране, формирующем модуляционные дорожки. Соответственно истинный размер источника  $S < 32$  км.

Этот предел существенно понижен в случае спектра № 37 от 17.11.87 [14, рис. 41]. Тщательные измерения группы из пяти модуляционных дорожек привели к следующим средним результатам:  $t = 20^{\text{h}}16^{\text{m}}26^{\text{s}} \pm 1^{\text{s}}$  UT;  $f = 21.6 \pm 0.2$  МГц;  $df/dt = -52 \pm 3$  кГц/с;  $\Delta f = 189 \pm 16$  кГц. Отсюда  $P = \Delta f/(df/dt) = 3.6 \pm 0.3$  с и  $D = 0.35 \pm 0.01R_J$ . Соответственно  $d_{\min} = 16 \pm 1$  км, что составляет 0.43 диаметра первой зоны Френеля. Следовательно, можно заключить, что размер источника ДИЮ меньше 16 км.

## 7. ВЫВОДЫ

С помощью нового алгоритма расчета дрейфов модуляционных дорожек уточнен ряд сведений о L-всплесках декаметрового излучения Юпитера.

1. Подтверждается связь Не-Ио-компонента ДИЮ с плазменным тором Ио (в отличие от работ [10—12], здесь исследован случай Не-Ио-В).

2. Зависящее от Ио северное ДИЮ (Ио-В) генерируется на магнитных силовых линиях, пересекающих орбиту Ио, но в  $39^\circ$  от истинного положения спутника в сторону вращения магнитосферы.

3. Северные области генерации ДИЮ, как независимого так и зависящего от Ио, наиболее активны на долготе  $\lambda_{\text{ист}} = 170^\circ \pm 10^\circ$  III системы вращения Юпитера (не путать с долготой центрального меридиана).

4. Так называемый источник Ио-С (северный) является иллюзией — областью повышенной вероятности наблюдения ДИЮ из-за локальной особенности топологии магнитного поля Юпитера.

5. Северное ДИЮ, не зависящее от Ио, в среднем направлено под углом  $64^\circ$  к магнитному полю в источнике (на частоте 22 МГц). У зависящего от Ио излучения этот угол немного больше и составляет  $68^\circ$ . Однако L-всплески иногда наблюдаются под углами, отличающимися от этих средних значений на  $10^\circ$ — $20^\circ$ .

6. Удастся понизить верхний предел монохроматического размера области генерации ДИЮ до 32 км и даже до 16 км на частотах около 22 МГц.

Полученные результаты и использованные алгоритмы планируется применить для изучения мелкомасштабной структуры магнитосферы Юпитера.

Автор выражает глубокую признательность Й. Й. Риихимаа и К. Имаи за предоставленную возможность ознакомиться с результатами их исследований.

1. Carr T. D., Desh M. D. Новейшие наблюдения Юпитера в декаметровый и гектометровый областях // Юпитер. — М.: Мир, 1979.—Т. 3.—С. 91—144.
2. Меес Ж. Астрономические формулы для калькуляторов. — М.: Мир, 1988.—168 с.
3. Смит Р. А. Модели декаметрового излучения Юпитера // Юпитер. — М.: Мир, 1978.—Т. 1.—С. 433—485.
4. Carr T. D., Desch M. D., Alexander J. K. Phenomenology of magnetospheric radio emissions // Physics of the Jovian magnetosphere / Ed. by A. J. Dessler. — Cambridge: Univ. press, 1983.—P. 269—270.
5. Connerney J. E. P., Acuna M. H. New models of Jupiter's magnetic field constrained by the Io flux tube footprint // J. Geophys. Res.—1998.—103, N A6.—P. 11929—11939.
6. Genova F., Aubier M. G. Io-dependent sources of the Jovian decameter emission // Astron. and Astrophys.—1985.—150, N 1.—P. 139—150.
7. 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.
8. Goldstein M. L., Eviatar A., Thieman J. R. A beaming model of the Io-independent Jovian decameter radiation based on multipole models of the Jovian magnetic field // Astrophys. J.—1979.—229, N 3.—P. 1186—1197.
9. 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—125.
10. Imai K., Riihimaa J. J., Reyes F., Carr T. D. Measurement of Jupiter's decametric radio source parameters by the modulation lane method // J. Geophys. Res.—2002.—107, N A6.—P. 101029—101039.
11. Imai K., Wang L., Carr T. D. A model for the production of Jupiter's decametric modulation lanes // Geophys. Res. Let.—1992.—19, N 9.—P. 953—956.
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. Queinnec J., Zarka P. Io-controlled decameter arcs and Io-Jupiter interaction // J. Geophys. Res.—1998.—103, N A11.—P. 26649—26666.
14. Riihimaa J. J. Modulation lanes revisited. — Oulu: Univ. of Oulu, 1993.—92 p.
15. Satoh T., Connerney J. E. P. Jupiter's  $H_3^+$  emissions viewed in corrected jovimagnetic coordinates // Icarus.—1999.—141, N 1.—P. 236—252.
16. Thieman J. R., Smith A. G. Detailed geometrical modeling of Jupiter's Io-related decametric radiation // J. Geophys. Res.—1979.—84, N A6.—P. 2666—2674.
17. Zarka Ph. Auroral radio emissions at the outer planets: observations and theories // J. Geophys. Res.—1998.—103, N E9.—P. 20159—20194.

Поступила в редакцию 07.05.03