

УДК 523.45

**А. В. Архипов**

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

### **УНЧ-модуляция S-компонента декаметрового радиоизлучения Юпитера**

*Модуляция декаметрового S-излучения Юпитера ультранизкочастотными магнитогидродинамическими волнами предполагалась многими исследователями. С точки зрения этой гипотезы рассмотрены муары, наблюдаемые на фоне последовательности S-всплесков, а также полосы S-излучения. Оценена альвеновская скорость и электронная плотность в области декаметровых радиоисточников. Полученные результаты согласуются с данными радиопокрытий космических аппаратов ионосферой Юпитера.*

*УНЧ-МОДУЛЯЦІЯ S-КОМПОНЕНТА ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА, Архипов О. В. — Модуляція декаметрового S-випромінювання Юпітера ультранизкочастотними магнітогідродинамічними хвилями припускалася багатьма дослідниками. За цією гіпотезою розглянуто муари, що спостерігаються на тлі послідовності S-сплесків, а також смуги S-випромінювання. Оцінено альвенівську швидкість та електронну густину в області декаметрових радіоджерел. Отримані результати узгоджуються з даними радіопокриттів космічних апаратів іоносферою Юпітера.*

*ULF MODULATION OF S-COMPONENT OF JOVIAN DECAMETRIC RADIO EMISSION, by Arkhipov A. V. — Modulation of Jovian decametric S-emission by ultralow-frequency magnetohydrodynamic waves have been supposed by many investigators. The moiré on S-train background and the bands of S-bursts are considered in terms of this hypothesis. The Alfvén velocity and the electron number density are estimated in the region of decametric radio sources. Our results are consistent with the radio occultation data.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Ультранизкочастотные (УНЧ) волны в магнитосфере Юпитера являются ценным источником информации о среде, окружающей планету. До сих пор они изучались лишь эпизодически с помощью космических аппаратов. Однако уже давно и многократно предполагалось, что декаметровое радиоизлучение Юпитера которое легко регистрируется наземными средствами, модулируется магнитогидродинамическими (МГД) волнами УНЧ-диапазона.

Например, альвеновские волны, которые генерируются при движении спутника Ио в магнитном поле Юпитера, считаются ответственными за

модуляцию радиоизлучения планеты с периодом орбитального вращения Ио (42.46 ч) [12, 24]. Другой период модуляции порядка нескольких минут связывали со временем распространения альвеновского возмущения вдоль магнитной силовой линии от одной полярной области Юпитера до другой, а после отражения — в обратном направлении [11].

Предполагалась модуляция декаметрового излучения и более коротковолновыми МГД-волнами. Так, Б. П. Рябов интерпретировал полосы S-всплесков в динамическом спектре радиоизлучения Юпитера как области максимального утолщения магнитной трубки Ио МГД-волной длиной несколько тысяч километров [9]. А. Г. Боев, М. Ю. Лукьянов и Н. А. Цвык [4] также предположили наличие такого периодического волнового возмущения границы трубки Ио, которое обеспечивает выход радиоизлучения к Земле лишь через периодически расположенные «окна прозрачности». Рассматривались и другие возможности модуляции: ускорение электронов продольными электрическими полями [16, 17, 23] и альвеновское искривление магнитной силовой линии радиоисточника [2].

Оценки скорости распространения модулирующей МГД-волны, которая считается близкой к скорости Альвена  $V_A$  [6], весьма различны: согласно [10] вне плазменного тора Ио  $V_A > 10^4$  км/с, около радиоисточников S-всплесков  $V_A \sim 10^5$  км/с [23]; для моделей А. Г. Боева характерна высокая электронная концентрация в источниках S-всплесков ( $10^6 \dots 10^7$  см $^{-3}$  [5]) и низкие скорости  $2 \cdot 10^3$  км  $< V_A < 2 \cdot 10^4$  км/с в водородной плазме на высотах генерации излучения на частотах 10—30 МГц. Однако Б. П. Рябов оценил, что «бульбы» на магнитной трубке Ио движутся гораздо медленнее — со скоростями всего 20 км/с [7] и даже 3—4 км/с [21]. Ввиду такой неопределенности здесь предпринята попытка решения следующих задач:

а) поиск проявлений УНЧ-модуляции в динамических спектрах S-излучения Юпитера;

б) оценка скорости  $V_A$  распространения модулирующих МГД-волн;

в) оценка электронной концентрации  $N_e$  в источниках S-излучения. Значение  $N_e$  в радиоисточнике является ключевым параметром как для проверки гипотезы о МГД-модуляции, так и для теории S-излучения.

#### МУАРЫ НА ФОНЕ S-БУРЬ

Важно, что приведенные выше оценки  $V_A$  соизмеримы со скоростями источников S-всплесков декаметрового радиоизлучения Юпитера. Двигаясь от Юпитера вдоль магнитной силовой линии, такой радиоисточник, как принято считать [25], генерирует излучение в узкой полосе частот (несколько кГц) вблизи локальной циклотронной частоты электронов. При этом на динамическом спектре формируется узкая полоса радиоизлучения, дрейфующая к низким частотам с характерной скоростью около 20 МГц/с. Нередко S-всплески генерируются квазипериодически с частотой около 20 Гц [13], создавая так называемую S-вереницу (S-train, рис. 1, а). Соответственно модулирующие пакеты МГД-волн могли бы наблюдаться как характерный узор (муар) на фоне достаточно густой S-вереницы. Скорость дрейфа муара по частоте должна отражать скорость распространения МГД-волны.

До сих пор внимание исследователей было сосредоточено почти исключительно на тонкой структуре и морфологии отдельных S-всплесков. Однако имеет смысл выделить детали спектра, которые являются общими для нескольких S-всплесков. Речь идет как об изменениях потока излучения вдоль каждого всплеска, так и о вариациях формы всплесков. Эта задача легко решается путем сглаживания динамического спектра фильтром Гаусса

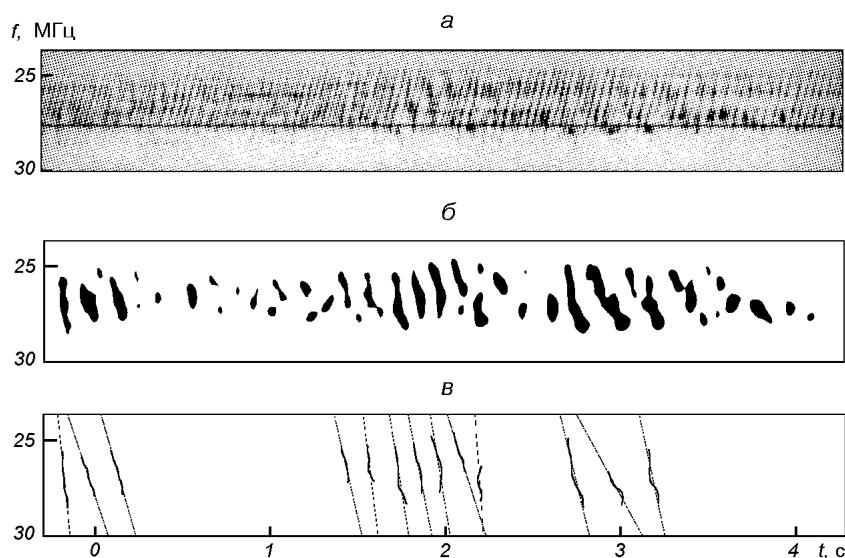


Рис. 1. Предположительная модуляция S-излучения МГД-волнами видна как правильный узор (муар) на фоне вереницы S-всплесков: *а* — исходный фрагмент динамического спектра 12.11.1988 г. [20]; *б* — визуализированный муар в виде пятен, которые дрейфуют к высоким частотам; *в* — оценивание скорости дрейфа муара с помощью линейной аппроксимации (тонкие прямые линии) медиан (толстые кривые) наиболее протяженных пятен

для замытия отдельных всплесков. Для визуализации оставшихся деталей спектра последовательно применялись стандартные фильтры графических пакетов: «барельеф» (emboss), подавляющий стационарные радиопомехи в виде горизонтальных полос на спектре и подчеркивающий детали муара; «изогелия» (threshold), отсекающий детали со слишком низким контрастом.

Поиск муаров был выполнен на основе акусто-оптических спектрограмм декаметрового радиоизлучения Юпитера, которые были опубликованы Й. Й. Риихимаа [20]. Четкий муар удалось выявить на динамическом спектре, записанном 12.11.1988 г. в 22:12 UT [20]. Он состоит из квазирегулярного набора полос (рис. 1, *а*, *б*). Полосы следуют с квазипериодом  $P = 0.17 \pm 0.04$  с, группируются в пакеты, возможно в волновые, и демонстрируют заметный дрейф к высоким частотам. Для измерения скорости их дрейфа были найдены медианы темных пятен на рис. 1, *б*, которые затем были аппроксимированы прямыми линиями с помощью метода наименьших квадратов (рис. 1, *в*). В результате усреднения наклонов аппроксимирующих прямых была получена оценка скорости дрейфа муара по частоте:  $df/dt = 52.3 \pm 8.5$  МГц/с. Это в сотни раз превышает скорость дрейфа хорошо известных модуляционных дорожек декаметрового радиоизлучения Юпитера. Следовательно, речь идет о совершенно ином феномене.

Согласно распространенной точке зрения [9, 17, 24, 25] частота S-излучения близка к локальной циклотронной частоте электронов ( $f \approx f_{ce}$ ). Тогда положительный знак дрейфа муара соответствует движению волны модуляции в сторону увеличения напряженности магнитного поля, т. е. к Юпитеру. При увеличении координаты  $x$  вдоль магнитной силовой линии радиоисточника, градиент изменения циклотронной частоты составляет  $df_{ce}/dx = 1.29$  кГц/км. Эта оценка получена в рамках модели магнитного поля VIP4 [14] при  $25 \text{ МГц} < f < 29 \text{ МГц}$ , северном радиоисточнике Ио-В (Й. Й. Риихимаа регистрировал излучение с правосторонней поляризацией [20]) и долготном смещении магнитной линии радиоисточника относительно Ио на  $39^\circ$  [3]. В рамках приближения  $f \approx f_{ce}$  скорость

движения модулирующей волны составляет  $dx/dt \approx (df/dt)/(df_{ce}/dx) = 40500 \pm 6600$  км/с. Аналогичная обработка другого спектра (12.11.1988 г., 21:59 UT [20]) привела к близким оценкам:  $df/dt = 58.4 \pm 5.8$  МГц/с и  $dx/dt = 44900 \pm 4500$  км/с. Отсюда следует оценка длины модулирующей волны:  $\lambda_w = P(dx/dt) = 7300 \pm 2000$  км.

#### ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ S-ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ

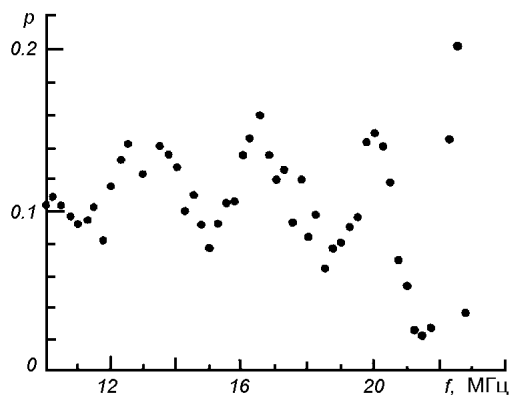
Возможна и другая форма проявления МГД-волн в динамическом спектре S-излучения Юпитера. Если длина волны больше шкалы высот  $H \sim 600$  км [22] ионосферы Юпитера, то следует ожидать существование волны, отраженной от ионосферы планеты, которую предсказывали многие исследователи [10, 16, 23]. Как проявления таких отражений альвеновской волны Ио были интерпретированы периодические пятна полярных сияний в магнитном следе Ио на Юпитере [15], а также квазипериодические арки в динамическом спектре декаметрового радиоизлучения планеты [11, 19].

Полученная выше оценка  $\lambda_w$  на порядок превосходит  $H$ . Соответственно, суперпозиция отраженной и падающей МГД-волн может создать стоячую волну, которая могла бы модулировать S-излучение преимущественно в областях пучностей. Этот эффект следует искать в виде устойчивых квазипериодических по частоте полос модуляции S-излучения, поскольку частота радиоизлучения является функцией положения его источника в пространстве ( $f \approx f_{ce}$ ).

В последнее время выдвинута гипотеза о стимуляции S-излучения именно мелкомасштабной альвеновской волной, частота которой определяет частоту повторения S-всплесков по времени [16, 23]. В этой связи большой интерес представляет тенденция S-всплесков концентрироваться на динамическом спектре в полосы, расположенные по частоте *квазипериодически* [4, 20, 21]. В рамках гипотезы о стоячей волне имеет смысл связать эту периодичность по частоте (т. е.  $\lambda_w$ ) с периодичностью S-всплесков по времени (т. е. с частотой модуляции  $f_w$ ). Такой подход до сих пор не использовался. Он нуждается в изучении как интересная возможность оценки скорости модулирующей волны.

С этой целью рассмотрим зависимость вероятности S-излучения от частоты, построенную по наблюдениям на радиотелескопе УТР-2 Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины наиболее мощных S-бурь 1980—1982 гг. [8]. На рис. 2 хорошо заметны колебания вероятности радиоизлучения в зависимости от частоты. Экстремумы отмечены на частотах 11.75, 13, 15, 16.5, 18.5, 20, 21.4, 22.5, 22.8 МГц. Частоты соседних максимумов (или минимумов) могут быть использованы для

Рис. 2. Модуляция средней вероятности появления S-излучения при наблюдении наиболее мощных S-бурь на радиотелескопе УТР-2 Радиоастрономического института НАН Украины в 1980—1982 гг. [8]



Параметры стоячей волны, модулирующей S-излучение

$f_1$ , МГц	$f_2$ , МГц	Полярность	$\lambda_w$ , км	$V_{ph}$ , км/с	$N_e$ , см <sup>-3</sup>	$Z - Z_0$ , км
11.75	15	север	13934	278684	148	11945
		юг	13241	264811	264	12541
13	16.5	север	13138	262755	347	10295
		юг	12466	249310	513	10945
15	18.5	север	11018	220363	1302	8053
		юг	10449	208973	1619	8773
16.5	20	север	9772	195441	2505	6502
		юг	9275	185508	2984	7269
18.5	21.4	север	7134	142686	7948	4830
		юг	6779	135578	9054	5644
20	22.5	север	5623	112453	16615	3638
		юг	5349	106972	18647	4480
21.4	22.8	север	2976	59525	75893	2873
		юг	2835	56698	83968	3731

Примечание:  $f_1, f_2$  — частоты соседних максимумов (или минимумов) вероятности S-излучения, согласно рис. 2

оценивания длины модулирующей волны. Такие оценки  $\lambda_w$  сделаны при использовании модели магнитного поля Юпитера VIP4 [14] в приближении  $f \approx f_{ce}$  (таблица). Ввиду отсутствия поляризационных измерений оценки  $\lambda_w$  сделаны для случаев северной и южной локализации радиоисточников при средней долготе Ио  $260^\circ$  (относительно магнитного поля планеты) и угле опережения  $20^\circ$ .

В таблице приведены оценки фазовой скорости модулирующей волны:  $V_{ph} = \lambda_w f_w$ , где  $f_w = 20$  Гц согласно оценке [13]. Эта скорость сравнима со скоростью света и много больше тепловых скоростей ионов. Поэтому ее следует отождествить со скоростью альвеновской волны (при распространении вдоль магнитной линии радиоисточника быстрая магнитозвуковая волна тождественна альвеновской [1]). Дисперсионное уравнение альвеновской волны в релятивистском приближении связано с плотностью среды [1]:

$$V_{ph} = (V_A^{-2} + c^{-2})^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света;  $V_A = B / (4\pi m_i n_i)^{1/2}$  — альвеновская скорость;  $B = f / 2.80$  МГц/Гц — магнитная индукция;  $m_i$  и  $n_i$  — масса и концентрация ионов. Так как основным компонентом Юпитера является водород (содержание 90 % [9]), легко оценить электронную концентрацию в приближении  $N_e = n_i$ . Полученные оценки  $N_e$  приведены в таблице и на рис. 3 в специальной шкале высот  $Z$ . Эта шкала учитывает центробежную силу, которая действует на плазму, коротящую с магнитным полем Юпитера [18]:

$$Z = R_j(1 - R_j/r) - (\Omega R_j)^2(r^3/R_j^3 - 1)/(2Lg), \quad (2)$$

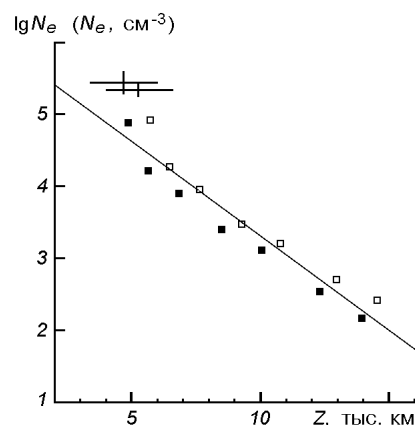
где  $R_j = 71372$  км — радиус Юпитера;  $r$  — планетоцентрическое расстояние;  $\Omega = 1.759 \cdot 10^{-4}$  рад/с — угловая скорость вращения Юпитера;  $L = 6$  — параметр Мак-Илвейна для Ио;  $g = 25.9$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения в экзобазе Юпитера.

Вблизи Юпитера профиль электронной концентрации можно аппроксимировать моделью диффузионного равновесия [18]:

$$N_e = N_0 \exp[-(Z - Z_0)/(2H)], \quad (3)$$

где  $N_0$  — электронная концентрация на высоте ионосферного максимума  $Z_0 = 2000$  км [22];  $H = k_b T / (m_i g)$  — шкала высот ( $k_b$  — постоянная

Рис. 3. Оценки электронной концентрации в источниках S-излучения на разных высотах  $Z$  по модели стоячей волны. Черные и светлые квадраты — оценки для северных и южных источников соответственно. Прямая линия — аппроксимация оценок моделью диффузионного равновесия [18]. Кресты — оценки  $N_e$  по скорости дрейфа муара (вертикальные усы — ошибки оценок, горизонтальные отрезки — охваченный диапазон высот)



Больцмана;  $T$  — температура). Полученная зависимость  $\lg N_e - Z$  (рис. 3) удовлетворительно соответствует этому уравнению. Более того, шкала высот  $H = 974 \pm 79$  км и  $\lg N_0 = 5.71 \pm 0.33$  ( $N_0$ ,  $\text{см}^{-3}$ ) в ионосферном максимуме приблизительно соответствуют оценкам, полученным по данным радиопокрытий космических зондов ионосферой Юпитера ( $400 < H < 960$  км;  $4.2 < \lg N_0 < 5.6$  [22]).

Аналогично вычислена электронная концентрация по оценкам  $V_{\text{ph}} = dx/dt$ , полученным по скорости частотного дрейфа муара (см. выше):  $N_e = (2.7 \pm 0.9) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  при  $3400 \text{ км} < Z < 6000 \text{ км}$  и  $(2.2 \pm 0.5) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  при  $4000 < Z < 6600 \text{ км}$ . Примечательно, что значения  $N_e$  получились того же порядка, что и в модели стоячей волны (рис. 3). Причиной расхождения  $N_e$  примерно в три раза может быть не только изменение концентрации во времени, но и невозможность измерения слишком быстрого дрейфа муара.

## ВЫВОДЫ

1. Впервые описаны ранее неизвестные детали динамического спектра декаметрового радиоизлучения Юпитера. Речь идет о муарах, которые наблюдаются на фоне S-бурь, дрейфуют по частоте со скоростями  $df/dt \sim 50$  МГц/с и повторяются с периодом 0.1—0.2 с.

2. Отмеченная скорость частотного дрейфа муара соответствует линейной скорости движения вдоль магнитной силовой линии радиоисточника порядка  $4 \cdot 10^4$  км/с. Если указанную скорость отождествить со скоростью альвеновских волн, то она соответствует электронной концентрации в радиоисточнике  $N_e \sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  на высотах около 5000 км.

3. Те же порядки оценок скорости модулирующей волны и  $N_e$  получаются также при анализе квазипериодических (по частоте) полос S-излучения в динамическом спектре. Эти полосы рассматриваются как проявление модуляции радиоизлучения мелкомасштабной ( $3000 < \lambda_w < 13000$  км), стоячей альвеновской волной, в соответствии с гипотезой [16, 23]. Полученные оценки шкалы высот  $H = 974 \pm 79$  км и максимальной концентрации электронов  $\lg N_0 = 5.71 \pm 0.33$  ( $N_0$ ,  $\text{см}^{-3}$ ) приблизительно согласуются с данными радиопокрытий космических зондов ионосферой Юпитера.

4. Поскольку два совершенно различных подхода к оцениванию  $V_{\text{ph}}$  и  $N_e$  в радиоисточнике дали сходные реалистичные результаты, гипотеза о модуляции S-излучения мелкомасштабными МГД-волнами заслуживает пристального изучения.

Результаты работы могут быть использованы для дистанционной диагностики плазмы в нижней магнитосфере Юпитера.

1. Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967.—101 с.
2. Архипов А. В. Моделирование морфологии S/NB-компонента декаметрового радиоизлучения Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 5.—С. 410—418.
3. Архипов А. В. О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: радиоисточники // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 5.—С. 387—396.
4. Боев А. Г., Лукьянов М. Ю., Цвык Н. А. О динамических спектрах S-радиоизлучения Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 6.—С. 27—46.
5. Боев А. Г., Щербинина Т. Е. О механизме образования S-всплесков декаметрового радиоизлучения Юпитера с положительным и более сложными типами частотного дрейфа // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—13, № 3.—С. 3—9.
6. Боев А. Г., Щербинина Т. Е. О частотных и временных характеристиках S-всплесков с линейным дрейфом ДКМ излучения Юпитера. I. Формирование всплеска // Радиофизика и радиоастрономия.—1998.—3, № 2.—С. 166—172.
7. Рябов Б. П. Спорадическое радиоизлучение Юпитера. Мультимасштабные динамические спектры // Радиофизика и радиоастрономия.—2001.—6, № 1.—С. 103—130.
8. Рябов Б. П., Архипов А. В., Шевченко В. А. Декаметровое радиоизлучение Юпитера. I. Морфология S-бурь // Астрон. вестник.—1985.—19, № 4.—С. 296—318.
9. Рябов Б. П., Герасимова Н. Н. Декаметровое спорадическое радиоизлучение Юпитера. — Киев: Наук. думка, 1990.—240 с.
10. Vagenal F. Alfvén wave propagation in the Io plasma torus // J. Geophys. Res.—1983.—88A, N 4.—P. 3013—3025.
11. Vagenal F., Leblanc Y. Io's Alfvén wave pattern and the Jovian decametric arcs // Astron. and Astrophys.—1988.—197, N 1-2.—P. 311—319.
12. Belcher J. W. The Jupiter-Io connection: an Alfvén engine in space // Science.—1987.—238, N 4824.—P. 170—176.
13. Carr T. D., Reyes F. Microstructure of Jovian decametric S bursts // J. Geophys. Res.—1999.—104, N A11.—P. 25127—25141.
14. 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.—103A, N 6.—P. 11929—11939.
15. Connerney J. E. P., Satoh T. The  $H_3^+$  ion: a remote diagnostic of the jovian magnetosphere // Phil. Trans. R. Soc. Lond.—2000.—A358.—P. 2471—2483.
16. Ergun R. E. S-bursts and the Jupiter ionospheric Alfvén resonator // 6th International Workshop on Planetary and Solar Radio Emissions, 20—22 April 2005, Graz, Austria. Abstracts. — Graz: Austrian Acad. Sc., 2005 (<http://pre6.oeaw.ac.at/viewabstract.php?ID=40>).
17. Galopeau P. H. M., Boudjada M. Y., Rucker H. O. Drift of jovian S-burst inferred from adiabatic motion in a parallel electric field // Astron. and Astrophys.—1999.—341, N 3.—P. 918—927.
18. Melrose D. B. Rotational effects on the distribution of thermal plasma in the magnetosphere of Jupiter // Planet. Space Sci.—1967.—15, N 2.—P. 381—393.
19. Queinnee J., Zarka P. Io-controlled decameter arcs and Io-Jupiter interaction // J. Geophys. Res.—1998.—103A, N 11.—P. 26649—26666.
20. Riihimaa J. J. Evolution of the spectral fine structure of Jupiter's decametric S-storms // Earth, Moon and Planets.—1991.—53, N 2.—P. 157—182.
21. Ryabov B. P., Zarka P., Rucker H. O., et al. Recurrent fine structures in Jovian S-burst emission // Planetary Radio Emissions IV / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux. — Vienna: Austrian Acad. Soc. Press, 1997.—P. 65—89.
22. Strobel D. F., Atreya S. K. Ionosphere // Physics of the Jovian magnetosphere / Ed. by A. J. Dessler. — Cambridge: Univ. Press, 1983.—P. 51—67.
23. Su Y.-J., Jones S. T., Ergun R. E., et al. Io-Jupiter interaction: Alfvén wave propagation and ionospheric Alfvén resonator. — Arlington: Univ. Texas, 2005.—34 p.—Preprint ([http://www.uta.edu/physics/research/su/paper/2005JGRSuetal\\_Jalfven.pdf](http://www.uta.edu/physics/research/su/paper/2005JGRSuetal_Jalfven.pdf)).
24. Zarka P. Auroral radio emission at the outer planets: observations and theories // J. Geophys. Res.—1998.—103E, N 9.—P. 20159—20194.
25. Zarka P., Ryabov B. P., Ryabov V. B., et al. On the origin of Jovian decameter radio bursts // Planetary Radio Emissions IV / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux. — Vienna: Austrian Acad. Soc. Press, 1997.—P. 51—63.

Поступила в редакцию 28.11.05