

## Каллисто как зонд для исследования декаметрового радиоизлучения Юпитера

А. В. Архипов

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
Украина, 61002, г. Харьков, Краснознаменная, 4  
E-mail: rai@ira.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 4 января 2001 г.*

Спутник Юпитера Каллисто иногда покрывает области генерации декаметрового (ДКМ) радиоизлучения планеты. Показано, что это обстоятельство может быть использовано для проверки теорий ДКМ-излучения и моделей магнитного поля Юпитера, а также для разрешения ДКМ-источников и их трехмерной локализации. Для демонстрации феноменологии покрытий вычислен вид тени Каллисто в динамическом спектре радиоизлучения Юпитера. Моделирование реалистичного спектра с тенью Каллисто и дифракционными осцилляциями потока радиоизлучения использовано для демонстрации возможностей фильтрации и распознавания ДКМ-затмений. Вычислены элементы покрытий ДКМ-источников на 2001 – 2010 гг.

Спутник Юпітера Каллісто іноді покриває області генерації декаметрового (ДКМ) радіовипромінювання планети. Показано, що ця обставина може бути використана для перевірки теорій ДКМ-випромінювання та моделей магнітного поля Юпітера, для знаходження розподілу ДКМ-джерел та їх тривимірної локалізації. Для демонстрації феноменології покриттів обчислено вигляд тіні Каллісто у динамічному спектрі радіовипромінювання Юпітера. Моделювання реалістичного спектра з тінню Каллісто та дифракційними осциляціями потоку радіовипромінювання використані для демонстрації можливостей фільтрації та розпізнавання ДКМ-затмєнь. Обчислені елементи покриттів ДКМ-джерел на 2001 – 2010 рр.

### 1. Введение

Декаметровое (ДКМ) радиоизлучение Юпитера является объектом многочисленных исследований уже 45 лет. Однако ряд ключевых вопросов до сих пор остается невыясненным.

1. Среди исследователей нет единства по вопросу о соотношении частоты ДКМ-излучения  $f$  и локальной гирочастоты электронов в области генерации  $f_c$ . Так, часть авторов полагает, что  $(f - f_c)/f_c < 0.01$  [1-3]. Согласно К. Хашимото и М. Л. Голдстейну,  $0.01 < (f - f_c)/f_c < 0.1$  [4]. Дж. Грин использовал значение  $(f - f_c)/f_c = 0.2$  [5]. Наконец, по теории А. Г. Боева  $(f - f_c)/f_c \sim 1$  [6].

2. Нет единства и в интерпретации несоответствия между максимальными частота-

ми ДКМ-излучения и экстраполированными значениями магнитного поля планеты по данным КА “Пионер-11”. Например, Дж. Коннерни [7, 8] совершенствовал модели поля путем учета мультиполей высших порядков. Ф. Женова и М. Эбье [9] объясняли расхождение большим временем запаздывания альвеновских волн, бегущих от спутника Ио к Юпитеру и приводящих к генерации ДКМ-излучения с задержкой по долготе на  $70^\circ$ . В модели Б. П. Рябова [10] гирочастота повышена за счет постулирования сверхсильных токов в магнитной трубке Ио.

3. Высказывались различные точки зрения и на расположение областей генерации не зависящего от Ио излучения: в одних работах его свя-

звали с плазменным тором Ио (параметр Мак-Илвейна  $L = 6$ ), в то время как в других публикациях это излучение относили к магнитным силовым линиям авроральной зоны ( $L \sim 20$ ) [11].

4. Остаются неизвестными размеры и структура источников ДКМ-излучения. Средствами наземной интерферометрии удалось оценить лишь верхний предел их размеров ( $< 400$  км [10]).

В результате неопределенность локализации источника ДКМ-излучения Юпитера сравнима с радиусом планеты. Экспериментально определить положение радиоисточника и его размеры можно методом покрытий, используя для этой цели галилеевы спутники Юпитера.

Впервые этот метод был применен 27 июня 1996 г. во время пролета КА "Галилей" вблизи Ганимеда [12]. Однако "Галилей" способен регистрировать радиопокрытия лишь на частотах ниже 5.6 МГц. Большая же часть ДКМ-диапазона ( $3 \div 30$  МГц) остается недоступной для станции. Но именно излучение на частотах  $10 \div 40$  МГц несет ценную информацию о магнитном поле и процессах в ближайших к Юпитеру частях магнитосферы – там, где не было прямых магнитометрических измерений. Кроме того, из-за близости "Галилея" к Ганимеду локализация радиоисточника была неоднозначной – были определены две возможные области источника [12].

Поэтому весьма актуальны наземные радиоастрономические наблюдения покрытий ДКМ-источников Юпитера галилеевыми спутниками. Предварительный анализ показал, что наиболее подходящим для этой цели объектом является Каллисто [13]. Ниже изложены результаты более подробного анализа и рекомендации наблюдателям.

## 2. Каллисто как экран

Радиус Каллисто составляет  $R_c = 2400 \pm 10$  км, что существенно меньше расстояния от Каллисто до центра Юпитера ( $a = 1880000$  км) и расстояния до Земли ( $b = 4.2 \div 6.2$  а. е.) [14]. Поэтому при наблюдении покрытий выполняется условие больших расстояний по сравнению с размерами затмевающего тела и дли-

ной волны ДКМ-излучения  $\lambda$ . В этом случае для затмевающей сферы решение уравнений Максвелла в дальней зоне асимптотически стремится к решению задачи дифракции Френеля на плоском диске [15].

$$\text{Радиус первой зоны Френеля, } R_1 = \left[ \frac{\lambda ab}{(a+b)} \right]^{1/2},$$

равен 237 км при  $f = 10$  МГц и 119 км при  $f = 40$  МГц. Поскольку  $R_1$  составляет не более 10 % радиуса Каллисто, тень спутника при освещении точечным источником должна быть хорошо выраженным темным пятном.

Неровности края ледяного лимба Каллисто не превышают 1 км [14], что составляет  $8 \div 26$  % ширины первой открытой зоны Френеля  $ac/2fR_c$ , где  $c$  – скорость света. Следовательно, в нашем случае Каллисто эквивалентен плоскому диску с ровным краем.

При изменении иоцентрического склонения Земли в пределах  $\pm 3.3^\circ$  Каллисто покрывает источники, лежащие в пределах полосы  $\pm 1.53R_j$  относительно центра диска планеты, где  $R_j$  – экваториальный радиус Юпитера.

## 3. Постановка задачи и основные алгоритмы

Для вычисления параметров покрытий ДКМ-радиоисточников Юпитера спутником Каллисто сделаны следующие уточнения.

**Локализация источников ДКМ-радиоизлучения Юпитера.** Согласно распространенному мнению [1-5, 9-11, 16], ДКМ-излучение генерируется в виде быстрой необыкновенной волны на частоте, близкой локальной гиромангнитной частоте электронов. При этом рефракция несущественна, если  $(f - f_c)/f_c \gg (f_p/f_c)^2$ , где  $f_p$  – ленгмюровская частота. Следовательно, при электронной концентрации  $N_e \sim 10^3$  см<sup>-3</sup> [2] на частоте 20 МГц рефракцию можно игнорировать уже при  $f/f_c = 1.002$ . Это позволяет упростить расчеты аппроксимацией  $f = f_c$ , тем более что данные поляриметрических измерений интерпретируются в пользу гораздо более низких значений  $N_e$  (не более 5 см<sup>-3</sup>) в окрестностях ДКМ-источников [17]. Разумеется,  $f$  может заметно превосходить  $f_c$ , но и тогда

приближение  $f = f_c$  имеет смысл как асимптотика-ориентир для поиска реальных покрытий.

Источники излучения, зависящего от Ио, традиционно считаются лежащими на магнитной силовой линии, проходящей через эффективное положение Ио на долготе  $\lambda_{\text{ио}} + d\lambda_{\text{ио}}$  [4, 9]. Здесь  $d\lambda_{\text{ио}}$  – угол опережения, по результатам УФ-наблюдений основания трубки Ио [18]  $d\lambda_{\text{ио}} = 14^\circ \cdot \sin(\lambda_{\text{ио}} + 59^\circ) + 14^\circ$  (в северном полушарии) и  $d\lambda_{\text{ио}} = 2^\circ \cdot \sin(\lambda_{\text{ио}} + 160^\circ) + 5^\circ$  (в южном полушарии).

Не зависящее от Ио излучение также генерируется на частоте, близкой гиромангнитной частоте электронов, но на силовых линиях, проходящих через авроральные зоны Юпитера ( $L \sim 21R_j$  [19]).

**Магнитное поле Юпитера** вычислялось по новейшей модели VIP-4 четвертого порядка, объединяющей измерения поля, выполненные КА “Вояджер-1, 2” и “Пионер-10, 11”, а также данные наблюдений свечения ионосферы на концах трубки Ио [8].

**Координаты Ио и Каллисто** в первом приближении вычислены по упрощенному алгоритму Ж. Меёса [20] и уточнены квадратичной интерполяцией результатов вычислений в *Bureau des Longitudes* (Париж) по теории Дж. Лиске. Среднеквадратичная ошибка определения положения Каллисто составляет всего 2.5 % радиуса спутника.

**Учет дифракции** осуществлялся путем численного интегрирования уравнения Френеля-Кирхгофа для поля сферической волны, взаимодействующей с плоским непрозрачным экраном, который моделирует диск Каллисто. Этот подход является общепринятым при расчете дифракции радиоволн на Луне и планетах при наземном приеме сигналов космических аппаратов [15]. Точность вычислений составляла 1 ÷ 2 %. При вычислении амплитуды пятна Пуассона (см. [13]) дополнительно учитывались сжатие спутника и неровности его лимба.

Для расчета картины покрытий ДКМ-источников Юпитера был создан комплекс следующих компьютерных программ:

**CALLVIP** – поиск покрытий зависящего от Ио ДКМ-излучения Юпитера спутником Каллисто на период с 1976 по 2018 гг. Точ-

ность момента времени затмения обычно составляет доли минуты, а соответствующая частота определяется с точностью в несколько десятков килогерц.

**NE\_IO** – поиск покрытий не зависящего от Ио компонента ДКМ-излучения Юпитера. Вычисляются интервал времени и полоса частот, благоприятные для затмений.

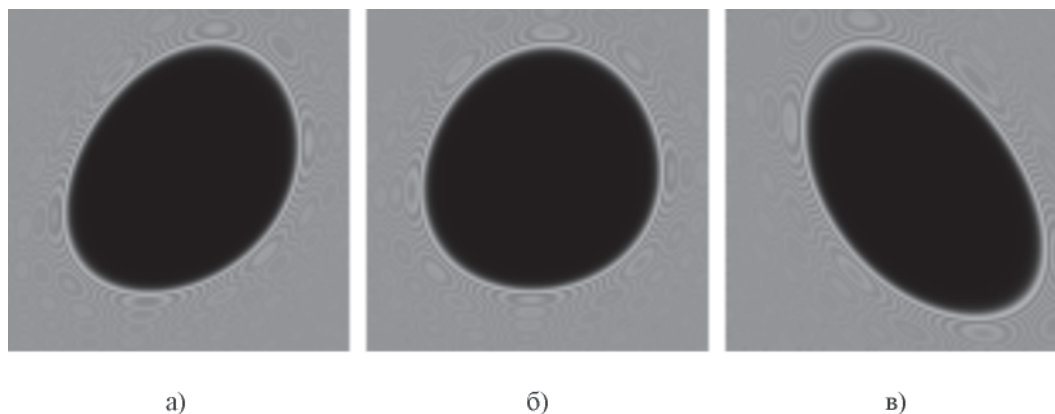
**CAL\_FVIP** – вычисление изображения тени Каллисто в динамическом спектре радиоизлучения, уточненного момента времени, длительности и полосы частот затмения.

**NEIOFVIP** – аналог CAL\_FVIP, но для не зависящего от Ио компонента.

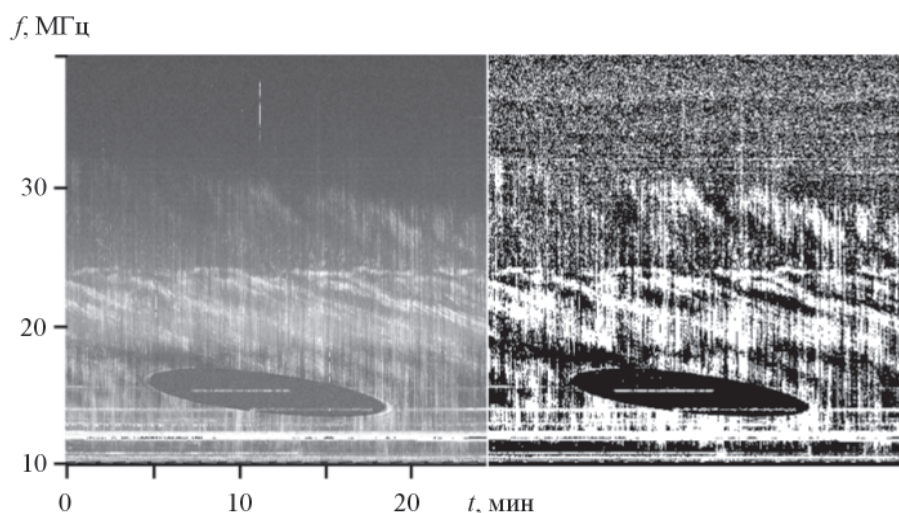
#### 4. Тень Каллисто в динамическом спектре ДКМ-излучения Юпитера

Поскольку на фиксированной частоте область генерации не удалось разрешить с помощью РСДБ и косвенными методами [16], монохроматические размеры источников ДКМ-излучения составляют не более 150 ÷ 200 км, или всего 3 ÷ 4 % поперечника спутника. Поэтому Каллисто, покрывая участок магнитной силовой линии, генерирующей ДКМ-излучение, экранирует определенную полосу частот в динамическом спектре. При этом, в результате орбитального движения Каллисто, в динамическом спектре излучения Юпитера формируется темное пятно – радиотень спутника. Согласно расчетам конкретных теней от точечных радиоисточников, силуэт Каллисто в спектре выглядит темным эллипсоидом с характерными размерами 7 ÷ 20 минут и 2 ÷ 5 МГц. Примеры вида радиотени приведены на рис. 1.

Форма тени Каллисто зависит от угла  $\alpha$  в картинной плоскости между направлением движения спутника и проекцией силовой линии магнитного поля, вдоль которой генерируется ДКМ-излучение. Этот угол можно измерить, поскольку  $\sin \alpha = \Delta f_{\text{max}} / \Delta f_{\Sigma}$ , где  $\Delta f_{\text{max}}$  – максимальная мгновенная ширина тени по частоте,  $\Delta f_{\Sigma}$  – полная частотная протяженность тени. С помощью модели магнитного поля можно найти точку на луче зрения, где реализуется данное значение  $\alpha$ . Таким образом, возможна *трехмерная локализация источника в пространстве*.



**Рис. 1.** Моделирование тени Каллисто в динамическом спектре ДКМ-излучения Юпитера 27.06.2001:  
 а) – покрытие источника He-Io-A при растворе его диаграммы направленности  $90^\circ$ ;  
 б) – покрытие источника He-Io-A при растворе его диаграммы направленности  $80^\circ$ ;  
 в) – покрытие источника Io-A



**Рис. 2.** Модель тени Каллисто 29.08.2010 на фоне радиобури 08.09.1999 при синоптических наблюдениях на УТР-2 в режиме ROUTINE (слева). Справа – результат фильтрации спектра алгоритмом SAAM с целью выделения тени и низкоконтрастных деталей изображения

На рис. 2 смоделирован реалистичный вид тени Каллисто в динамическом спектре. При этом динамический спектр радиотени, вычисленной для покрытия южной ветви магнитной трубки Ио 29 августа 2010 г., перемножен с динамическим спектром реальной радиобури Юпитера, записанной 8 сентября 1999 г. при близких значениях  $SML$  и  $\Phi_{\text{Ио}}$  ( $SML$  – это долгота центрального меридиана Юпитера;  $\Phi_{\text{Ио}}$  – орбитальная долгота Ио, отсчитываемая от точки верхнего геоцентрического соединения)

на радиотелескопе УТР-2 РИ НАНУ в режиме ROUTINE (спектроанализатор Hewlett-Packard). Соблюден масштаб и осуществлена привязка тени к шкале частот.

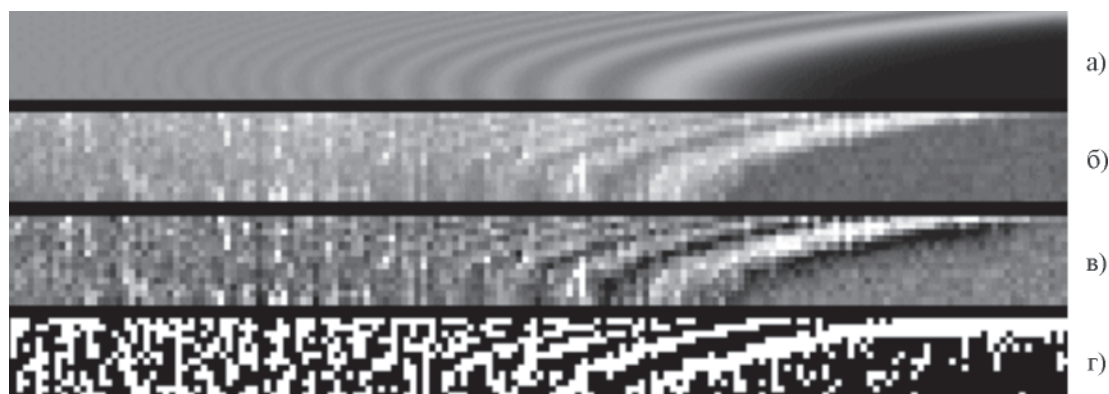
Очевидно, в реальной ситуации тень может быть менее контрастной из-за паразитной засветки другими источниками ДКМ-излучения (например, с северной ветви трубки Ио). Поэтому при поиске реальных теней Каллисто может использоваться фильтрация динамического спектра. Один из алгоритмов такой

фильтрации (SAAM) предложен автором. Он заключается в клиппировании разности исходного изображения и его сглаженного варианта. При этом если пиксел изображения ярче сглаженного уровня, то такой пиксел считается “белым”, а если темнее – то “черным”. Получаемое двухцветное изображение четко показывает детали предельно низкого контраста, размер которых меньше окна сглаживания. Результат применения этого алгоритма приведен на рис. 2 справа, где хорошо виден черный эллипсоид тени Каллисто и горизонтальные детали в верхней части спектра, не различимые на исходном изображении.

Если в динамическом спектре тень Каллисто видна лишь частично, ее край может быть опознан по характерным дифракционным осцилляциям потока излучения. На рис. 3 показан край радиотени, рассчитанный для покрытия трубки Ио 27.06.2001 г. в масштабе динамического спектра, записываемого при наблюдениях на УТР-2 в режиме ROUTINE. Ниже приведен результат перемножения динамических спектров дифракционного узора и реальной радиобури, датированной 08.09.1999 г. Фильтрация полученного изображения (фильтры High Pass, SAAM) демонстрирует возможность обнаружения до четырех дифракционных максимумов. Четвертое кольцо исчезает, если размер источ-

ника излучения составляет  $\sim 100$  км. При размере источника  $\sim 200$  км неразличимо и первое кольцо. Следовательно дифракционные полосы можно использовать для оценки монохроматического размера источника излучения.

Гораздо большие возможности по разрешению источника могли бы дать наблюдения пятна Пуассона. При сферической форме Каллисто в центре его тени дифракция формирует изображение источника с беспрецедентным разрешением  $\sim 8$  км. Характерные размеры (на уровне половины амплитуды) изображения точечного источника при покрытии трубки Ио 27.06.2001 г. оказываются равны 1.0 с и 4.8 кГц. Как показало численное моделирование, неровности лимба Каллисто ( $\sim 1$  км [14]) слабо влияют на амплитуду пятна Пуассона. Но такое пятно имеет амплитуду, сравнимую с радиофоном покрытия, только если динамическое сжатие спутника не превышает 0.006. К сожалению, даже медленное вращение Каллисто вокруг оси (период равен 16.75 сут) приводит к втрое большему динамическому сжатию спутника и амплитуде пятна Пуассона на уровне  $1 \div 3\%$  от фона вокруг тени. Таким образом, наблюдение пятна Пуассона весьма проблематично. Но отсутствие прямых измерений сжатия Каллисто оставляет некоторую надежду.



**Рис. 3.** Дифракционные кольца на краю радиотени Каллисто 27.06.2001 при наблюдении источника Ио-А на УТР-2 в режиме ROUTINE:

*а* – вычисленный динамический спектр дифракционного узора;

*б* – результат перемножения динамических спектров узора и реальной радиобури;

*в* – обработка синтезированного изображения фильтром High Pass;

*г* – результат применения алгоритма SAAM

## 5. Каталог покрытий

Для планирования наблюдений Юпитера был составлен банк данных, содержащий основные параметры 326 покрытий областей генерации ДКМ-радиоизлучения Юпитера спутником Каллисто на период 2001 – 2010 гг. Интерес представляют те события, при которых покрытия происходят на фоне излучения основных источников Юпитера (Ио-А, Ио-В, Ио-С, Ио-Д, Не-Ио-А, Не-Ио-В, Не-Ио-С [16, 21]), обладающих повышенной вероятностью генерации ДКМ-излучения. Такие события отбирались по картам распределения излучения в плоскости  $CML - \Phi_{\text{ио}}$ . При этом использовались карты, построенные отдельно для правополяризованного (северного) и левополяризованного (южного) излучений [21, 22]. События, происходящие на частотах ниже 10 МГц, были отброшены как практически недоступные для наблюдений с поверхности Земли по причине помех и непрозрачности ионосферы. Покрытия не зависящих от Ио радиоисточников при  $f > 25$  МГц также игнорировались из-за низкой вероятности излучения на высоких частотах.

В табл. 1 и 2 представлены полученные результаты: дата покрытия; положение центра тени в динамическом спектре (всемирное время (UT) и частота в МГц); долгота центрального меридиана Юпитера (CML в градусах); орбитальная долгота Ио ( $\Phi_{\text{ио}}$  в градусах); полушарие (N – северный источник, S – южный источник); географические координаты пункта, где в момент покрытия Юпитер будет виден в зените (долгота и широта в градусах). Эти координаты позволяют легко вычислить зенитное расстояние Юпитера в момент покрытия при наблюдении из произвольного пункта. Зенитное расстояние равно угловому расстоянию между пунктом наблюдения и пунктом с табличными координатами.

В случае покрытий источников, не зависящих от Ио, моменты затмений вычислены в предположении о перпендикулярности между вектором магнитного поля в источнике и направлением на Землю, что приводит к двум покрытиям около каждого нижнего соединения Каллисто. Моменты покрытий источников с более узкими диаграммами направленности располагаются между этой парой предельных покрытий. Таким

**Таблица 1.** Параметры покрытий Ио-источников декаметрового радиоизлучения Юпитера спутником Каллисто в 2001 – 2010 гг.

| Дата       | UT    | $f$ , МГц | CML, ° | $\Phi_{\text{ио}}$ , ° | N/S | Долгота, ° | Широта, ° |
|------------|-------|-----------|--------|------------------------|-----|------------|-----------|
| 27.06.2001 | 08:02 | 17.6      | 223.0  | 224.8                  | S   | 51.0       | 23.1      |
| 02.09.2001 | 17:39 | 22.3      | 207.0  | 247.7                  | S   | 215.8      | 22.8      |
| 01.11.2004 | 08:01 | 13.6      | 266.2  | 230.3                  | N   | 26.3       | -2.1      |
| 04.12.2004 | 22:50 | 11.4      | 6.9    | 225.3                  | N   | 137.3      | -4.4      |
| 26.07.2005 | 13:19 | 9.9       | 329.1  | 243.5                  | N   | 48.9       | -3.8      |
| 16.07.2007 | 20:00 | 10.5      | 185.9  | 234.9                  | N   | 15.7       | -21.5     |
| 13.08.2010 | 02:59 | 14.6      | 180.8  | 101.2                  | S   | 357.7      | -0.3      |
| 29.08.2010 | 19:35 | 15.2      | 313.4  | 258.8                  | S   | 91.8       | -0.9      |
| 20.11.2010 | 21:27 | 24.7      | 281.5  | 251.3                  | S   | 334.2      | -3.9      |

образом, в табл. 2 каждая пара покрытий, близких по дате, может рассматриваться как границы интервала времени, в течение которого могут наблюдаться затмения источников. Время и число покрытий на таком интервале зависят от неизвестных априори количества и расположения излучающих пучков электронов.

В ближайшее время на Украине желательны наблюдения следующих покрытий (расчеты сделаны для радиотелескопа УТР-2, РИ НАНУ, Харьков).

26 января 2001 г., 21:34 ÷ 22:37 UT. Хотя это событие не вошло в каталог, не исключено, что высокая чувствительность УТР-2 позволит обнаружить фрагменты края радиотени Каллисто на фоне слабого южного излучения границы источника He-Ио-А на частоте ~12 МГц ( $CML = 186 \div 224^\circ$ ;  $\Phi_{\text{ио}} = 37 \div 46^\circ$ ). Зенитное расстояние Юпитера ( $Z$ ) составит  $60 \div 70^\circ$ .

24 мая 2001 г., 12:34 ÷ 14:01 UT. Высокое положение планеты над горизонтом ( $Z = 35 \div 48^\circ$ )

дает надежду наблюдать дневное покрытие центральной области источника He-Ио-С на частотах 17.6 ÷ 20.3 МГц. Но возможны помехи от Солнца, которое будет находиться в  $15^\circ$  от Юпитера.

10 июня 2001 г., 09:41 ÷ 10:34 UT. Покрытия ожидаются на частотах 20.8 ÷ 22.0 МГц, предельно низких для дневного наблюдения центральных областей одного из самых активных радиоисточников Юпитера – He-Ио-А. Хотя  $Z = 27 \div 28^\circ$ , элонгация Юпитера составит лишь  $3^\circ$ .

27 июня 2001 г., 08:02 UT. Редкий шанс наблюдать покрытие южного излучения весьма активного источника Ио-А. Верхняя кромка тени Каллисто должна располагаться выше 19.5 МГц. Зенитное расстояние Юпитера составит только  $29^\circ$ , но планета будет находиться всего в  $9.3^\circ$  от Солнца.

Затем до ноября 2004 г. покрытия ДКМ-радиоисточников Юпитера будут недоступны для наблюдения на территории Украины и Западной Европы.

**Таблица 2.** Параметры покрытий не зависящего от Ио декаметрового радиоизлучения Юпитера спутником Каллисто в 2001 – 2010 гг.

| Дата       | UT    | $f$ ,<br>МГц | $CML$ , ° | $\Phi_{\text{ио}}$ , ° | N/S | Долгота, ° | Широта, ° |
|------------|-------|--------------|-----------|------------------------|-----|------------|-----------|
| 12.02.2001 | 14:03 | 11.3         | 310.1     | 191.7                  | S   | 67.2       | 19.9      |
| 12.02.2001 | 15:50 | 13.1         | 14.8      | 206.7                  | S   | 40.4       | 19.9      |
| 18.03.2001 | 03:26 | 13.1         | 356.9     | 176.0                  | S   | 196.8      | 20.7      |
| 18.03.2001 | 05:21 | 14.2         | 66.7      | 192.2                  | S   | 167.9      | 20.7      |
| 03.04.2001 | 23:18 | 15.2         | 242.4     | 357.1                  | S   | 245.8      | 21.2      |
| 04.04.2001 | 00:19 | 16.3         | 279.0     | 5.7                    | S   | 229.7      | 21.2      |
| 24.05.2001 | 12:34 | 17.6         | 317.5     | 192.5                  | S   | 8.0        | 22.6      |
| 24.05.2001 | 14:01 | 20.3         | 10.1      | 204.8                  | S   | 346.2      | 22.6      |
| 10.06.2001 | 09:41 | 20.8         | 248.0     | 24.3                   | S   | 38.6       | 22.9      |
| 10.06.2001 | 10:34 | 22.0         | 279.9     | 31.8                   | S   | 25.4       | 22.9      |
| 21.12.2004 | 15:36 | 13.0         | 142.5     | 22.2                   | N   | 231.3      | -5.2      |
| 21.12.2004 | 17:57 | 14.5         | 227.8     | 42.1                   | N   | 196.0      | -5.2      |

Таблица 2. (Продолжение)

| Дата       | UT    | $f$ ,<br>МГц | CML, ° | $\Phi_{\text{ю}}$ , ° | N/S | Долгота, ° | Широта, ° |
|------------|-------|--------------|--------|-----------------------|-----|------------|-----------|
| 24.01.2005 | 03:04 | 9.9          | 126.3  | 352.6                 | N   | 28.2       | -6.1      |
| 24.01.2005 | 05:49 | 11.3         | 226.0  | 15.9                  | N   | 347.0      | -6.1      |
| 09.02.2005 | 20:56 | 10.9         | 304.0  | 159.3                 | N   | 104.7      | -6.0      |
| 09.02.2005 | 21:57 | 9.3          | 341.0  | 167.9                 | N   | 89.3       | -6.0      |
| 31.03.2005 | 16:02 | 9.0          | 99.9   | 217.4                 | N   | 124.8      | -4.2      |
| 31.03.2005 | 18:33 | 11.2         | 190.9  | 238.9                 | N   | 87.1       | -4.2      |
| 17.04.2005 | 07:13 | 10.5         | 181.2  | 4.5                   | N   | 238.3      | -3.4      |
| 17.04.2005 | 09:35 | 9.6          | 267.0  | 24.5                  | N   | 202.8      | -3.4      |
| 03.05.2005 | 22:31 | 12.8         | 266.1  | 151.0                 | N   | 351.5      | -2.7      |
| 03.05.2005 | 23:48 | 10.6         | 312.1  | 161.8                 | N   | 332.4      | -2.7      |
| 20.05.2005 | 13:30 | 14.6         | 338.5  | 295.8                 | N   | 108.9      | -2.3      |
| 20.05.2005 | 14:18 | 13.1         | 7.5    | 302.5                 | N   | 96.9       | -2.3      |
| 12.08.2005 | 05:33 | 15.9         | 83.2   | 33.3                  | N   | 150.7      | -4.8      |
| 12.08.2005 | 07:01 | 19.1         | 136.0  | 45.6                  | N   | 128.9      | -4.9      |
| 14.09.2005 | 22:58 | 15.7         | 274.4  | 49.5                  | N   | 222.9      | -7.3      |
| 15.09.2005 | 00:03 | 13.0         | 314.1  | 58.8                  | N   | 205.5      | -7.3      |
| 21.11.2005 | 08:50 | 11.2         | 263.8  | 73.2                  | N   | 20.7       | -12.4     |
| 21.11.2005 | 10:13 | 9.2          | 313.9  | 85.0                  | N   | 359.9      | -12.4     |
| 08.12.2005 | 03:28 | 8.6          | 105.4  | 243.2                 | N   | 87.8       | -13.5     |
| 08.12.2005 | 06:17 | 10.4         | 207.4  | 266.9                 | N   | 45.6       | -13.5     |
| 01.09.2006 | 10:12 | 11.0         | 220.7  | 268.7                 | N   | 88.5       | -15.0     |
| 01.09.2006 | 12:07 | 9.2          | 290.2  | 285.0                 | N   | 59.9       | -15.0     |
| 05.10.2006 | 01:41 | 11.9         | 342.3  | 268.8                 | N   | 187.7      | -16.8     |
| 05.10.2006 | 02:34 | 10.8         | 14.4   | 276.3                 | N   | 174.4      | -16.8     |
| 21.10.2006 | 22:21 | 11.6         | 256.6  | 95.6                  | N   | 225.4      | -17.7     |
| 21.10.2006 | 23:48 | 9.5          | 309.0  | 108.0                 | N   | 203.7      | -17.7     |
| 07.11.2006 | 17:26 | 9.8          | 113.2  | 270.0                 | N   | 286.2      | -18.6     |
| 07.11.2006 | 20:09 | 11.7         | 211.9  | 292.9                 | N   | 245.4      | -18.6     |
| 11.12.2006 | 11:54 | 11.9         | 343.5  | 293.9                 | N   | 343.4      | -20.2     |



Таблица 2. (Продолжение)

| Дата       | UT    | $f$ ,<br>МГц | CML, ° | $\Phi_{\text{ю}}$ , ° | N/S | Долгота, ° | Широта, ° |
|------------|-------|--------------|--------|-----------------------|-----|------------|-----------|
| 11.12.2006 | 12:48 | 10.8         | 15.9   | 301.4                 | N   | 330.1      | -20.2     |
| 28.12.2006 | 08:49 | 11.7         | 267.7  | 124.2                 | N   | 16.7       | -20.9     |
| 28.12.2006 | 10:08 | 9.6          | 315.4  | 135.3                 | N   | 357.0      | -20.9     |
| 14.01.2007 | 03:32 | 10.0         | 112.4  | 294.7                 | N   | 82.9       | -21.4     |
| 14.01.2007 | 06:14 | 11.8         | 210.4  | 317.5                 | N   | 42.4       | -21.4     |
| 16.02.2007 | 20:16 | 12.0         | 283.7  | 306.6                 | N   | 165.5      | -22.0     |
| 16.02.2007 | 21:24 | 9.9          | 325.1  | 316.3                 | N   | 148.3      | -22.0     |
| 05.03.2007 | 13:21 | 10.9         | 71.5   | 106.6                 | N   | 254.5      | -22.2     |
| 05.03.2007 | 14:56 | 12.8         | 129.1  | 120.1                 | N   | 230.7      | -22.2     |
| 22.03.2007 | 08:38 | 12.0         | 299.5  | 284.1                 | N   | 309.8      | -22.3     |
| 22.03.2007 | 09:38 | 10.1         | 336.2  | 292.7                 | N   | 294.6      | -22.3     |
| 11.05.2007 | 08:28 | 11.6         | 265.0  | 20.3                  | N   | 261.5      | -22.2     |
| 11.05.2007 | 09:48 | 9.5          | 313.5  | 31.7                  | N   | 241.5      | -22.2     |
| 27.05.2007 | 22:48 | 11.9         | 315.9  | 159.0                 | N   | 28.8       | -22.0     |
| 27.05.2007 | 23:43 | 10.3         | 349.5  | 166.8                 | N   | 14.9       | -22.0     |
| 13.06.2007 | 12:40 | 12.3         | 349.4  | 294.6                 | N   | 161.9      | -21.8     |
| 13.06.2007 | 13:33 | 11.2         | 21.5   | 302.2                 | N   | 148.7      | -21.8     |
| 16.07.2007 | 17:03 | 12.1         | 78.4   | 209.6                 | N   | 60.2       | -21.5     |
| 16.07.2007 | 18:38 | 14.4         | 136.4  | 223.2                 | N   | 36.2       | -21.5     |
| 02.08.2007 | 10:12 | 13.9         | 228.9  | 12.2                  | N   | 145.3      | -21.4     |
| 02.08.2007 | 11:51 | 11.7         | 288.9  | 26.2                  | N   | 120.5      | -21.4     |
| 04.09.2007 | 19:50 | 14.5         | 142.6  | 327.3                 | N   | 329.6      | -21.7     |
| 04.09.2007 | 22:03 | 16.4         | 222.7  | 346.0                 | N   | 296.5      | -21.7     |
| 08.10.2007 | 10:38 | 18.3         | 240.3  | 323.1                 | N   | 77.8       | -22.3     |
| 08.10.2007 | 12:00 | 15.8         | 290.0  | 334.7                 | N   | 57.3       | -22.3     |
| 25.10.2007 | 05:10 | 19.2         | 77.2   | 132.0                 | N   | 146.2      | -22.6     |
| 25.10.2007 | 06:23 | 22.1         | 121.2  | 142.4                 | N   | 128.0      | -22.6     |
| 27.11.2007 | 23:27 | 24.6         | 299.7  | 155.2                 | N   | 207.1      | -23.1     |
| 28.11.2007 | 00:10 | 20.6         | 325.8  | 161.4                 | N   | 195.3      | -23.1     |

Таблица 2. (Продолжение)

| Дата       | UT    | $f$ ,<br>МГц | CML, ° | $\Phi_{\text{Ю}}$ , ° | N/S | Долгота, ° | Широта, ° |
|------------|-------|--------------|--------|-----------------------|-----|------------|-----------|
| 14.12.2007 | 19:57 | 24.6         | 208.0  | 341.1                 | N   | 246.9      | -23.2     |
| 14.12.2007 | 21:25 | 24.7         | 261.2  | 353.4                 | N   | 224.9      | -23.2     |
| 10.07.2010 | 18:31 | 21.5         | 303.2  | 153.4                 | S   | 158.6      | 0.0       |
| 10.07.2010 | 19:42 | 24.7         | 346.3  | 163.5                 | S   | 140.7      | 0.0       |
| 15.09.2010 | 08:02 | 17.5         | 296.3  | 22.5                  | S   | 246.3      | -1.8      |
| 15.09.2010 | 09:18 | 20.1         | 342.0  | 33.2                  | S   | 227.4      | -1.8      |
| 01.10.2010 | 22:09 | 18.7         | 338.5  | 160.5                 | S   | 16.2       | -2.6      |
| 01.10.2010 | 23:39 | 21.6         | 33.3   | 173.2                 | S   | 353.5      | -2.7      |

## 6. Выводы

Как показано выше, Каллисто играет роль своеобразного зонда для исследования Юпитера. Регулярно покрывая области генерации ДКМ-излучения, этот спутник способен “пролить свет” на целый ряд нерешенных задач, имеющих ключевое значение для понимания природы спорадического радиоизлучения Юпитера:

а) Каллисто позволяет определять точные координаты источников радиоизлучения в пространстве (в том числе и трехмерные координаты, что не доступно средствам наземной радиоинтерферометрии);

б) появляется возможность измерить отношение частоты излучения к локальной гиро-частоте электронов в источнике, что важно для проверки теорий ДКМ-излучения;

в) покрытия дают информацию о напряженности и геометрии магнитного поля Юпитера в ближайших к планете областях – там, где прямые измерения не проводились (это важно для проверки и уточнения существующих моделей магнитного поля Юпитера);

г) дифракционные полосы на краю тени Каллисто дают возможность судить о размерах излучающей области.

Продемонстрирована картина покрытий, предложен алгоритм для выделения тени Каллисто в динамическом спектре радиоизлучения

Юпитера. Создан комплекс компьютерных программ для вычисления формы тени Каллисто в динамическом спектре и параметров покрытий, что позволило составить каталог таких событий на ближайшее десятилетие.

Другим направлением исследований является поиск записей покрытий в архивах радиоастрономических обсерваторий, осуществляющих многолетние синоптические наблюдения Юпитера. К сожалению, результаты поиска пока отрицательны. Оказалось, что наблюдения Юпитера на УТР-2 РИ НАНУ в 1980 – 1999 гг. во время покрытий либо не осуществлялись вовсе, либо выполнялись на слишком высоких частотах. Данные наблюдений Радиоастрономической обсерватории в Нанси (Франция) труднодоступны. Удалось получить лишь распечатки двух сеансов наблюдений, непригодных для обработки из-за обилия радиопомех. Богатый архив Флоридского университета охватывает измерения только на трех частотах (18.0; 20.0 и 22.2 МГц), что затрудняет регистрацию и опознавание радиотени Каллисто. Тем не менее, анализ архивных данных представляет интерес и должен продолжаться.

Автор весьма признателен Ф. Зарке, Дж. Коннерни, Дж. Лиске и Г. О. Рукеру за консультации и поддержку исследований.

## Литература

1. J. D. Menietti, J. L. Green, S. Gulkis, F. Six. *J. Geoph. Res.* 1984, **89**, No. A3, pp. 1489-1495.
2. А. В. Архипов. Кинематика и физика небесных тел. 1989, **5**, №5, с. 68-74.
3. Y. Leblanc, G. A. Dulk, F. Vagenal. *Astron. Astrophys.* 1994, **290**, pp. 660-673.
4. K. Hashimoto, M. L. Goldstein. *J. Geoph. Res.* 1983, **88**, No. A3, pp. 2010-2020.
5. J. L. Green. *Radio Science.* 1984, **19**, No. 2, pp. 556-570.
6. А. Г. Боев, М. Ю. Лукьянов. *Астрон. журн.* 1991, **68**, №4, с. 853-862.
7. J. E. P. Connerney. In: *Planetary Radio Emissions III*. Wien: Österreichischen Akad. der Wissenschaften. 1992, pp. 13-33.
8. J. E. P. Connerney, M. H. Acuna, N. F. Ness, T. Satoh. *J. Geoph. Res.* 1998, **103**, No. A6, pp. 11929-11939.
9. F. Genova, M. G. Aubier. *Astron. Astrophys.* 1985, **150**, No. 1, pp. 139-150.
10. Б. П. Рябов, Н. Н. Герасимова. Декаметровое спорадическое радиоизлучение Юпитера. Киев, Наук. думка, 1990, 240 с.
11. F. Genova. In: *Etude Comparative des Systemes Magnetospheriques*. Conf. int. La Londe les Maures, Sept. 1985. Toulouse, 1986, pp. 477-495.
12. W. S. Kurth, D. A. Gurnett, S. J. Bolton, A. Roux, S. M. Levin. In: *Planetary Radio Emissions IV*. Wien: Österreichischen Akad. der Wissenschaften. 1997, pp. 1-13.
13. А. В. Архипов. In: *Planetary Radio Emissions IV*. Wien: Österreichischen Akad. der Wissenschaften, 1997, pp. 129-132.
14. Ph. Masson. *Space Science Reviews.* 1984, **38**, No. 3/4, pp. 281-324.
15. В. А. Андрианов. В сб.: *Распространение радиоволн*. Москва, Наука, 1975, с. 355-364.
16. T. D. Car, M. D. Desh, J. K. Alexander. In: *Physics of the Jovian Magnetosphere*, Ed. by A. J. Dessler. Cambridge, Cambridge Univ. Press. 1983, pp. 226-284.
17. V. E. Shaposhnikov et al. In: *Planetary Radio Emissions IV*. Wien: Österreichischen Akad. der Wissenschaften. 1997, pp. 143-151.
18. J. T. Clarke et al. *Science.* 1996, **274**, No. 5286, pp. 404-409.
19. T. Satoh, J. E. P. Connerney. *Icarus.* 1999, **141**, No. 1, pp. 236-252.
20. Ж. Меёс. *Астрономические формулы для калькуляторов*. Москва, Мир, 1988, 168 с.
21. Т. Д. Карр, М. Д. Деш. В сб.: *Юпитер*. Т. 3. Под ред. Т. Герелса. Москва, Мир, 1979, с. 91-144.
22. M. Y. Boudjada, F. Genova. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1991, **91**, No. 2, pp. 453-467.

### Callisto as a Probe for Examination of Jovian Decameter Radio Emission

A. V. Arkhipov

Sometimes the Jovian satellite Callisto occults some sources of the planet's decameter radio emission (DAM). It is shown that these events can be used for testing current DAM theories and magnetic models, they can also be used for 3D-localization and resolution of DAM sources. The Callisto shadows in the DAM dynamical spectrum are calculated to demonstrate the occultation appearance. Simulations of realistic DAM spectrum with Callisto shadow and diffraction fringes are obtained to demonstrate the possibility of filtering and recognition of DAM eclipses. The elements of forthcoming occultations for 2001 – 2010 are calculated.