

## Декаметровое радиоизлучение вспыхивающих красных карликовых звезд

Э. П. Абранин, И. Ю. Алексеев<sup>1</sup>, Л. Л. Базелян, А. И. Браженко<sup>2</sup>, Р. Е. Гершберг<sup>1</sup>,  
В. Н. Лисаченко, Н. И. Шаховская<sup>1</sup>

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

*<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория,  
Украина, 98409, Крым, Научное*

*<sup>2</sup>Полтавская гравиметрическая обсерватория НАН Украины,  
Украина, 36029, г. Полтава, ул. Мясоедова, 27/29*

*Статья поступила в редакцию 15 мая 2001 г.*

Представлены результаты наблюдений спорадического декаметрового радиоизлучения вспыхивающих красных карликовых звезд, которые проводились на радиотелескопе УТР-2 в период с 1986 по 1995 г. Радионаблюдения вспыхивающих звезд в ДКМ диапазоне сопровождались оптическими наблюдениями в U-полосе в Крымской астрофизической обсерватории.

Для поиска всплесков звездного происхождения в условиях высокого уровня природных и техногенных помех использовались различные критерии, основанные на анализе спектральных, пространственных и временных особенностей сигналов, регистрировавшихся в ходе наблюдений.

В 1992 г. при наблюдениях звезды EV Lac были обнаружены четыре всплеска, которые с высокой вероятностью имеют звездное происхождение. Яркостные температуры их источников  $T_b \approx 10^{18}$  К.

Обсуждаются возможные механизмы возникновения таких высоких яркостных температур.

Представлені результати спостережень спорадичного декаметрового радіовипромінювання спалахуючих червоних карликових зірок, що проводилися на радіотелескопі УТР-2 у період з 1986 по 1995 р. Радіоспостереження спалахуючих зірок в ДКМ діапазоні супроводжувалися оптичними спостереженнями в U-смузі у Кримській астрофізичній обсерваторії.

Для пошуку сплесків зоряного походження в умовах високого рівня природних і техногенних завад використовувалися різні критерії, засновані на аналізі спектральних, просторових і часових особливостей сигналів, що реєструвалися в ході спостережень.

В 1992 р. під час спостережень зірки EV Lac були виявлені чотири сплески, які з високою імовірністю мають зоряне походження. Яскравісні температури їхніх джерел  $T_b \approx 10^{18}$  К.

Обговорюються можливі механізми виникнення таких високих яскравісних температур.

### 1. Введение

Вспыхивающие красные карликовые звезды – это объекты нижней части главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-

Рессела, на которых происходят спорадические скоротечные вспышки. Обычно это звезды спектральных классов M и K, в их спектрах обнаруживается сильная водородная и кальциевая эмиссия, и они обозначаются как

dMe и dKe звезды [1]. Первая переменная звезда этого типа была открыта Герцшпрунгом в созвездии Киля в 1924 году, и только спустя четверть века было обнаружено еще 4 таких объекта. Среди них была и звезда UV Cet, которая стала прототипом вспыхивающих красных карликовых звезд [2]. Сейчас в окрестностях Солнца, до 20 парсек, известно около 500 таких объектов. Из-за их низкой светимости видимая плотность таких звезд с удалением от Солнца быстро уменьшается. Однако по некоторым оценкам эти объекты являются наиболее многочисленными и составляют большинство звезд Галактики [3].

Будучи меньше Солнца по массе ( $(0.1 \div 0.9)M_{\odot}$ ) и по размерам ( $(0.1 \div 0.8)R_{\odot}$ ), вспыхивающие красные карлики имеют атмосферы плотностью до  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  с температурами до  $10^7 \text{ К}$  в основаниях корон [4]. Температуры их фотосфер составляют  $2.5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^3 \text{ К}$ , напряженности магнитных полей в них достигают нескольких тысяч гаусс. Содержащие такие поля темные пятна покрывают до  $30 \div 40 \%$  поверхности звезд. Оптические звездные вспышки на  $2 \div 3$  порядка превосходят интенсивности средних солнечных вспышек и соответствуют вспышкам в белом свете, происходящим на Солнце [3].

Сопоставление наблюдательных данных в оптическом, рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах свидетельствует о глубоком сходстве проявлений активности на вспыхивающих звездах и Солнце [1]. Не явилось исключением и радиоизлучение. Спорадическое радиоизлучение вспыхивающих звезд на метровых и дециметровых волнах было открыто в 1963 г. [5]. Преодолевая значительные экспериментальные трудности, удалось установить, что яркостные температуры источников этого излучения превышают  $10^{12} \text{ К}$ , степень круговой поляризации многих всплесков оказалась больше  $50 \%$ , они коррелируют с оптическими вспышками и имеют спектральный индекс  $-5 < \alpha < -1$  [6-9].

Огромный прогресс в исследованиях радиоизлучения dMe вспыхивающих звезд на сантиметровых волнах в 80-е годы ознаменовался открытием ряда явлений, подобных наблюдаемым в солнечном радиоизлучении: тонких вре-

менных и спектральных структур, частотного дрейфа всплесков, постоянного и спорадического компонентов в излучении и др. [2, 10-13]. Эти радиоастрономические результаты также подтверждают гипотезу солнечно-звездной аналогии [14]. В соответствии с ней следует ожидать интенсивного спорадического ДКМ радиоизлучения вспыхивающих звезд.

В первом из опубликованных экспериментов, с использованием плеча север-юг антенны типа креста Миллса, на частоте  $19.7 \text{ МГц}$  вблизи начала оптической вспышки был обнаружен всплеск радиоизлучения звезды V371 Orion. Он имел чрезвычайно большую плотность потока  $F = 23000 \text{ Ян}$ , что соответствует яркостной температуре  $\sim 10^{20} \text{ К}$ . Важно, что всплеск одновременно наблюдался и на двух других частотах  $1440$  и  $410 \text{ МГц}$  [15].

Из других низкочастотных наблюдений известен обзор 15 вспыхивающих звезд, выполненный с помощью Кулгурского радиогелиографа на частотах  $80$  и  $160 \text{ МГц}$ . Его целью являлся поиск долгоживущих ( $\sim 10$  минут) звездных всплесков. За  $110$  часов совместных с астрономами-любителями наблюдений были независимо зарегистрированы 21 оптическая вспышка и 19 радиособытий, но лишь 4 пары радиовсплесков и оптических вспышек оказались близки по времени. Три из этих четырех оптических вспышек были короткими импульсными событиями, после которых наблюдались длительные радиовсплески. Это напоминает солнечные всплески II и IV типов и шумовые бури после сильных вспышек. Таким образом, большинство оптических вспышек не вызывало обнаруживаемую радиоэмиссию и, наоборот, радиовсплески часто фиксировались в отсутствие оптических вспышек [16].

В середине 80-х годов в обсерватории Кларк Лейк был проведен поиск метрового спорадического радиоизлучения вспыхивающих звезд. За  $143$  часа обзора 12-ти dMe звезд на 7 частотах в диапазоне  $30.9 \div 110.6 \text{ МГц}$  на пределе чувствительности только на частоте  $110.6 \text{ МГц}$  наблюдалось два слабых всплеска звезды AD Leo [17].

Перечисленные выше работы исчерпывают все опубликованные эксперименты по обнаружению низкочастотного ( $< 100 \text{ МГц}$ )

всплескового компонента излучения вспыхивающих звезд. Как видно, только один из них оказался удачным на ДКМ волнах [15]. Но и полученная в нем огромная яркостная температура источника, превышающая на  $4 \div 5$  порядков величины яркостные температуры источников самых мощных солнечных всплесков, настораживает и, во всяком случае, нуждается в подтверждении.

Созданный в начале 70-х годов в Радиоастрономическом институте НАН Украины радиотелескоп УТР-2 по своим параметрам отвечает всем требованиям к инструменту, предназначенному для наблюдений спорадического радиоизлучения. Это позволяло полагать, что с помощью этого крупнейшего радиотелескопа удастся получить более определенные данные о ДКМ радиоизлучении вспыхивающих звезд. Поиск их спорадического излучения велся эпизодически с 1986 по 1998 год в основном в рамках международной кооперативной программы, которая проводилась по инициативе Крымской астрофизической обсерватории (КрАО).

## 2. Аппаратура

Расстояния даже до ближайших dMe вспыхивающих звезд много больше (в  $10^5$  раз), чем до Солнца. Поэтому при их обзоре в условиях высокого уровня помех земного происхождения необходима реализация максимальной чувствительности и высокой помехозащищенности радиотелескопа.

### 2.1. Радиотелескоп УТР-2

Широкополосный ( $10 \div 25$  МГц) Т-образный радиотелескоп УТР-2 образован двумя антенными решетками: “С-Ю” (1800 м в направлении север-юг) и “З-В” (900 м в направлении запад-восток). Антенна “С-Ю” состоит из двух решеток, каждая из которых содержит 720 широкополосных вибраторов (6 рядов по 120 вибраторов). Антенна “З-В” имеет 6 рядов по 100 вибраторов. В обеих антеннах расстояния между вибраторами в направлении север-юг – 7.5 м и в направлении запад-восток – 9 м. Дискретная система фазирования лучей имеет  $2 \cdot 10^6$  положений в секторе обзора  $U = \sin Z \sin A = \pm 0.833$  и  $V = \sin Z \cos A = \pm 1$

( $A, Z$  – азимут и зенитный угол луча соответственно). Перемножение диаграмм направленности (ДН) этих антенн позволяет сформировать по координате  $V$  веер из пяти независимых карандашных лучей с шириной ДН каждого луча  $25'/\cos Z$  на частоте 25 МГц. По координате  $V$  соседние лучи разнесены на  $1/150$ , что приводит к пересечению ДН соседних лучей на частоте 25 МГц на уровне половинной мощности. В антенне “С-Ю” предусмотрена возможность подавления бокового излучения на 11 и 20 дБ путем реализации распределения токов типа Дольфа-Чебышева [18]. Потери в схеме антенны компенсируются системой усилителей. Их высокий динамический диапазон и линейность в сочетании с оптимальным распределением усилителей в приемном тракте антенны практически исключают возможность появления комбинационных помех [19].

### 2.2. Радиометры

На различных этапах обзора использовались три типа радиометров. Сначала (1986-1989 гг.) это была штатная приемная аппаратура УТР-2: радиометры с фазовой модуляцией  $0 \div \pi$ , частотой переключения  $\approx 10$  Гц, шириной полосы  $\Delta f \approx 10$  кГц и постоянной времени  $\Delta t = 3 \div 5$  с. В 1992 году ее заменили на три комплекта двухканальных радиометров с  $\Delta f \approx 10$  кГц и  $\Delta t = 0.2$  с, которые были специально изготовлены для регистрации звездного радиоизлучения. Они обеспечивали формирование карандашных лучей при любой длительности принимаемых всплесков (см. ниже 5.2). Чувствительность радиотелескопа с этими радиометрами на частоте 25 МГц при средней температуре космического фона  $\approx 7 \cdot 10^4$  К и отношении сигнал/шум равном 3 составляла около 100 Ян.

Наконец, в наблюдениях 1997 и 1998 гг. одновременно с узкополосными, использовались также два комплекта двухканальных широкополосных ( $\Delta f = 300$  кГц) радиометров. Контроль помех от радиостанций в их полосе пропускания осуществлялся с помощью динамического спектрографа с полосой анализа 5 кГц.

В качестве регистрирующих устройств на всех этапах обзора применялись самописцы с чернильной записью на бумажную ленту со скоростью протяжки 1 мм/с.

### 2.3. Оптический телескоп

Радионаблюдения dMe вспыхивающих звезд во все годы сопровождалась фотометрическим патрулем их блеска в U-полосе, который велся в КраО с помощью UBVRi фотометра-поляриметра [20], установленного на 1.25-метровом телескопе АЗТ-11. Наблюдательные данные, в случае неблагоприятных погодных условий в Крыму, иногда удавалось дополнить данными некоторых зарубежных обсерваторий.

## 3. Наблюдения

### 3.1. Объекты наблюдений

Используемый в наблюдениях коротковолновый диапазон (10 ÷ 25 МГц) характеризуется высоким уровнем радиопомех. Для его минимизации из ближайших dMe звезд с высокой вспышечной активностью в обзор

предпочтительно включались те, для которых в направлении на звезду, во-первых, зенитный угол не превышал критической величины, определяемой экранирующим влиянием ионосферы, и, во-вторых, уровень дифракционного лепестка ДН радиотелескопа был мал. К сожалению, этим условиям удовлетворяет крайне ограниченное число звезд. Поэтому в обзор были включены и другие dMe звезды, для которых указанные выше требования не выполнялись, но приоритет по длительности наблюдений был отдан первым. Включенные в обзор звезды перечислены в табл. 1.

### 3.2. Методика наблюдений

Наблюдения dMe звезд велись, как правило, в ночное время осенне-зимнего сезона. Этот период характеризуется неустойчивой погодой в северном полушарии, что существенно затрудняет оптические наблюдения, но является наиболее благоприятным для радионаблюдений ввиду сезонного минимума помех.

Каждая из звезд наблюдалась циклами по 4 ÷ 6 ночей. Их длительности выбирались несколько больше периодов осевого вращения

Таблица 1. Включенные в обзор dMe вспыхивающие звезды

| №                  | Звезда   | Координаты                        |                 | Расстояние, пс | Даты циклов наблюдений | Длительность циклов, ч | Лучи УТР-2 ON/OFF |
|--------------------|----------|-----------------------------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|-------------------|
|                    |          | $\alpha_{1950}$                   | $\delta_{1950}$ |                |                        |                        |                   |
| 1                  | YY Gem   | 7 <sup>h</sup> 31.4 <sup>m</sup>  | 31°58.8'        | 14.7           | 28.11 – 02.12.1992     | 30                     | 3/5               |
| 2                  | YZ CMi   | 7 <sup>h</sup> 42.1 <sup>m</sup>  | 3°40.8'         | 6              | 02.12 – 06.12.1994     | 33                     | 2/4               |
| 3                  | AD Leo   | 10 <sup>h</sup> 16.9 <sup>m</sup> | 20°7.3'         | 4.8            | 21.12 – 22.12.1994     | 12                     | 2/4               |
|                    |          |                                   |                 |                | 21.01 – 24.01.1993     | 26                     | 3/5               |
| 4                  | CN Leo   | 10 <sup>h</sup> 54.1 <sup>m</sup> | 7°19.2'         | 2.3            | 11.01 – 15.01.1995     | 25                     | 2/4               |
|                    |          |                                   |                 |                | 01.03 – 04.03.1993     | 7                      | 2/5               |
| 5                  | Wolf 461 | 12 <sup>h</sup> 58.1 <sup>m</sup> | 5°57.1'         | 8.3            | 01.02 – 05.02.1995     | 28                     | 2/4               |
|                    |          |                                   |                 |                | 01.03 – 05.03.1995     | 29                     | 2/4               |
| 6                  | CD Dra   | 16 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup>   | 55°23.8'        | 20.8           | 01.03 – 04.03.1993     | 21                     | 2/5               |
| 7                  | EV Lac   | 22 <sup>h</sup> 44.7 <sup>m</sup> | 44°4.6'         | 5.1            | 09.09 – 12.09.1986     | 24                     | 3/2, 4            |
|                    |          |                                   |                 |                | 09.09 – 14.09.1987     | 36                     | 3/2, 4            |
|                    |          |                                   |                 |                | 04.09 – 07.09.1989     | 24                     | 3/2, 4            |
|                    |          |                                   |                 |                | 01.09 – 06.09.1992     | 30                     | 3/5               |
|                    |          |                                   |                 |                | 08.09 – 12.09.1993     | 30                     | 2/5               |
|                    |          |                                   |                 |                | 26.08 – 31.08.1994     | 36                     | 2/4               |
|                    |          |                                   |                 |                | 22.08 – 29.08.1997     | 35                     | 2/4               |
| 10.09 – 16.09.1998 | 30       | 2/5                               |                 |                |                        |                        |                   |

звезды с тем, чтобы ее можно было осмотреть со всех сторон, а календарные даты – вблизи новолуния, как наиболее благоприятные для оптических наблюдений. Ввиду высокого уровня помех от радиостанций радионаблюдения обычно оказывались возможны только после 21:00 UT.

Калибровка приемной аппаратуры выполнялась генератором стандартного шума и по трем источникам космического радиоизлучения: 3C274, 3C310 и 3C405. Калибровки по источникам понадобились потому, что помимо штатного режима работы радиотелескопа в наблюдениях использовался и нештатный (см. ниже 4.2)

#### 4. Отождествление радиовсплесков

В ДКМ диапазоне в условиях высокого уровня помех от связных радиостанций, промышленных устройств, атмосфериков и др. возникает необходимость сортировки принятых радиовсплесков на звездные и помехи земного происхождения. Иногда сигнал от помехи удается распознать по его спектральным или временным особенностям. Так, помехи от радиостанций обычно имеют модуляцию и ширину полосы в несколько кГц, атмосферные помехи – форму аperiodических или быстро затухающих колебаний длительностью  $0.1 \div 3$  с. Однако чаще всего отличить помеху от звездного всплеска очень трудно, поскольку, как следует из высокочастотных наблюдений, они имеют очень похожие временные профили. Поэтому методика наблюдений должна предусматривать способы их отождествления.

##### 4.1. Метод ON/OFF

При наблюдениях одновременно двумя лучами УТР-2 дискретно, с шагом две минуты, сопровождалась звезда (канал ON) и смещенная относительно нее область неба (канал OFF). На время переключения системы фазирования антенны входы радиометров отключались от антенн.

Обнаружение всплеска в канале ON и его отсутствие в OFF в некоторых работах являлись основным, а иногда и единственным,

доводом в пользу признания его звездным. В [2] отмечается недостаток этого метода, связанный с тем, что лучи ON и OFF, в принципе, имеют разные ДН. Тем не менее он продолжает широко использоваться, так как позволяет исключить из рассмотрения помехи, принятые одновременно по обоим лучам [21]. При этом, поскольку отклики в обоих каналах вызваны одним и тем же сигналом, они должны быть коррелированы.

В УТР-2 отношение уровней боковых лепестков луча OFF и основного лепестка луча канала ON меняется с изменением направления фазирования. Но, как следует из расчетов и измерений по дискретным источникам, в обзоре оно не превышало 8 %.

##### 4.2. Сопоставление потоков $F_{\times}$ и $F_{+}$

Применение двухканальных радиометров позволяет одновременно наблюдать звезду двумя разными лучами, которые формируются перемножением ( $F_{\times}$ ) и суммированием ( $F_{+}$ ) ДН антенн “С-Ю” и “З-В” УТР-2. Если отклик всплеска с точностью до ошибок измерений  $F_{\times} \neq F_{+}$ , то это определено помехой. Однако если  $F_{\times} \approx F_{+}$ , то всплеск, возможно, принят от звезды по основным лепесткам или, с меньшей вероятностью, является помехой, принятой по случайно равным боковым лепесткам существенно различных лучей.

##### 4.3. Корреляция всплесков со вспышками блеска звезды

Этот метод успешно и многократно применялся [9, 22]. Вместе с тем в некоторых микроволновых наблюдениях отмечена слабая связь между вспышками и всплесками [23, 24], что может быть обусловлено избирательным эффектом, так как всплески обычно регистрируются на пределе чувствительности радиотелескопов [2]. Характерно, что такая же неопределенность имеет место и на Солнце. Здесь по данным различных авторов корреляция между всплесками и вспышками колеблется от 0.1 до 0.8. Причем верхней границе соответствуют наиболее интенсивные события [25]. Именно такие звездные всплески, вероятнее всего, оказываются доступными для наземных наблюдений. Кроме того, следует отметить, что

известные из литературы данные не свидетельствуют о существовании пропорциональной зависимости между максимальным потоком всплеска и амплитудой оптической вспышки. Можно только утверждать о существовании такой тенденции [26].

Что касается фазы вспышки, при которой появляется всплеск, то на звездах, как и на Солнце, определенная связь отсутствует: на высоких частотах всплески наблюдаются как до, так и после взрывной фазы вспышки [9, 27]. Чаще всего в литературе полагают, что если всплеск наблюдается в 10-минутном интервале относительно вспышки, то они генетически связаны [9].

#### 4.4. Полярность отклика

В ДКМ диапазоне помехи от связанных радиостанций, далеких грозových очагов и др. чаще всего принимаются под низкими углами места по боковым лепесткам луча радиотелескопа. В примененном способе формирования карандашного луча УТР-2 отклики сигналов, принятые по четным и нечетным боковым лепесткам, имеют на записи противоположную полярность. Поэтому, если обнаружен отклик с противоположной основному лепестку полярностью, то он, безусловно, вызван помехой.

#### 4.5. Двухчастотный прием

Во время наблюдений в канале ОН работало как минимум два комплекта приемной аппаратуры одновременно на частотах  $f_1 = 25$  МГц и  $f_2 = 20$  МГц. Это позволяло оценивать ширину полосы излучения всплесков, их спектральный индекс и, главное, исключить из рассмотрения те всплески, отклики которых на различных частотах имели противоположные полярности.

Кроме того, на ДКМ волнах, в отличие от более коротких, видимо, должно стать заметным влияние дисперсии среды даже при относительно небольших расстояниях до звезд. Согласно [28], в окрестностях Солнца средняя электронная плотность в некоторых направлениях может достигать  $0.02 \div 0.03 \text{ см}^{-3}$ . Тогда, как показывают оценки, задержка всплеска на частоте  $f_2$  относительно  $f_1$  может составить несколько десятых долей секунды. Совпадение расстояний, определенных по дисперсии

среды и тригонометрическому параллаксу, явится веским доводом в пользу звездного происхождения всплеска.

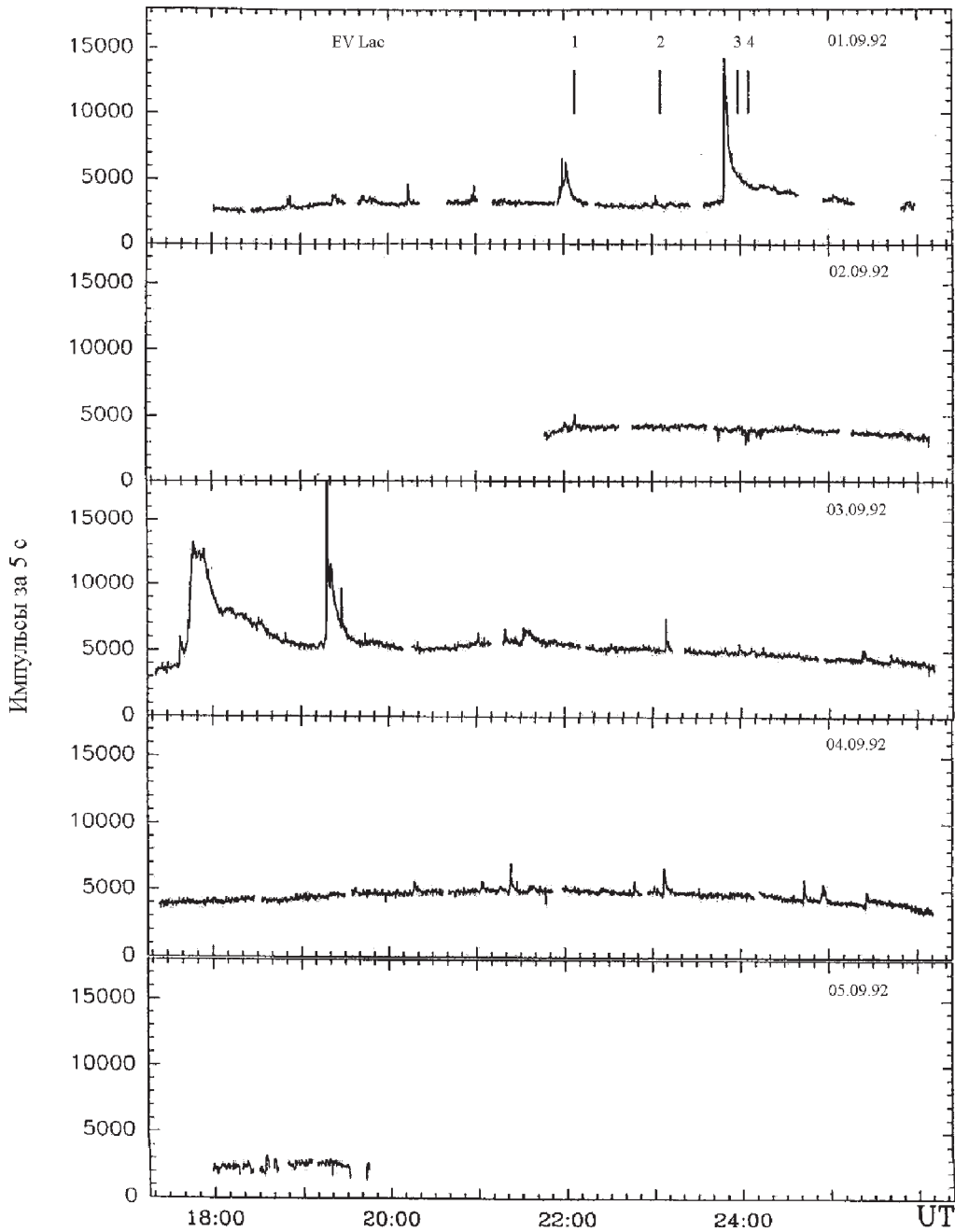
## 5. Результаты наблюдений

### 5.1. Оптика

Наиболее полные данные были получены для звезды EV Lac (см. табл. 1). На рис. 1 приведены типичные данные ее мониторинга в U-полосе, полученные в 1992 году. Как видно, имели место только импульсные вспышки, характерные для звезд типа UV Cet. На Солнце такие вспышки (за исключением интенсивных) чаще всего не сопровождаются всплесками ДКМ излучения. Наиболее тесная связь между ними имеет место для вспышек с большими временами возгорания и угасания. Однако во всем нашем обзоре такие вспышки вообще не наблюдались.

На рис. 2 приведено распределение вспышек блеска звезды EV Lac по эквивалентным длительностям  $P = \int [(I_f - I_0)/I_0] dt$ . Здесь  $I_f$ ,  $I_0$  – интенсивности излучения звезды во время вспышки и в стационарном состоянии, соответственно. Эти вспышки были обнаружены в U-полосе за 81 ч радионаблюдений в 1992-1995 гг. после 21:00 UT [29-31]. Средняя частота появления вспышек в этот период оказалась  $\approx 0.8$  вспышек/ч. Но она неравномерна как по суткам, так и по годам. Так, в 1989 году за 24 часа наблюдений ни одной вспышки обнаружено не было.

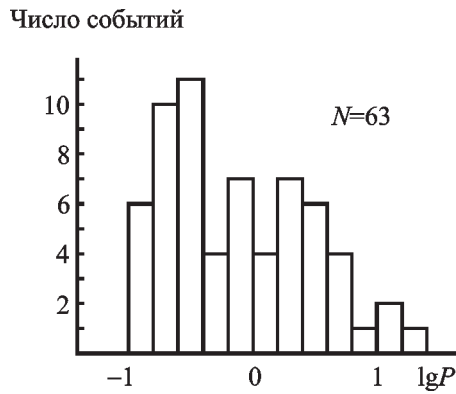
Основной вклад в частоту появления вносят слабые вспышки, а более мощные, с  $P$  в несколько десятков минут, появляются очень редко. В ходе обзора максимальные длительность ( $\approx 90$  мин) и эквивалентная длительность ( $P \approx 25$  мин) оказались у вспышки, которая произошла 01.09.1992 г. в  $\approx 23:50$  UT (см. рис. 1). Любопытно, что поскольку светимость EV Lac в стационарном состоянии в U-полосе составляет примерно  $6.3 \cdot 10^{28}$  эрг/с, то полная энергия этой вспышки  $\approx 1.5 \cdot 10^{32}$  эрг, т. е. на порядок величины больше, чем у самых мощных солнечных вспышек во всем оптическом диапазоне.



**Рис. 1.** Кривые блеска EV Lac в U-полосе, полученные в КраО в 1992 г. Отмечены положения ДКМ всплесков, зарегистрированных радиотелескопом УТР-2 01.09.1992 г.

Что касается остальных 6 звезд, то позитивный результат на ДКМ волнах за  $\approx 210$  ч обзора был получен только от YZ CMi. На средних широтах эта звезда из-за низкого склонения ( $\approx 3^{\circ}40'$ ) крайне неудобна для наблюдений, но существует мнение, что ее ак-

тивность в радиодиапазоне заметно выше, чем у EV Lac. Мониторинг блеска звезды YZ CMi велся одновременно в Крыму (U-полоса) и в Греции (B-полоса). Записи в КраО из-за плохих погодных условий оказались сильно зашумленными. В Греции за 6.5 ча-



**Рис. 2.** Распределение вспышек блеска *EV Lac* в *U*-полосе по эквивалентным длительностям *P* во время наблюдений в 1992-1995 гг. (общее число событий  $N = 63$ )

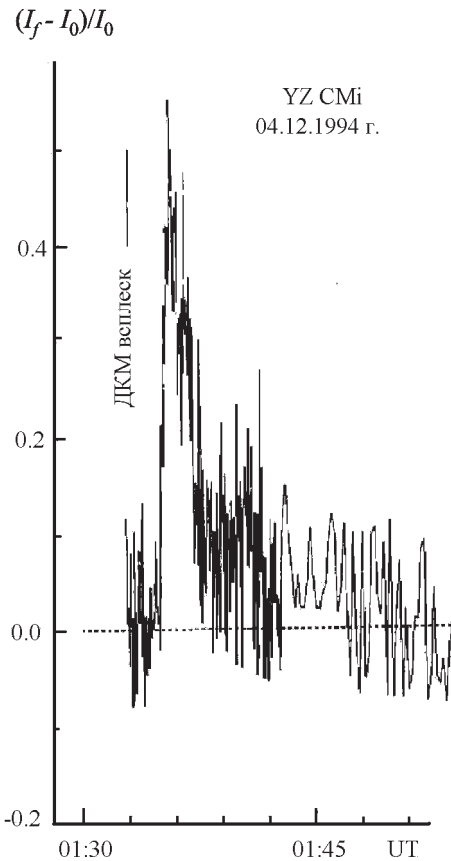
сов сопровождения звезды 30-дюймовым рефлектором обсерватории Стефанион наблюдалась единственная вспышка с амплитудой  $\Delta B = 0.475$  звездной величины и эквивалентной длительностью 1.2 мин [32], что соответствует  $\Delta U \approx 2$  звездным величинам [26] (см. рис. 3).

### 5.2. *EV Lac* в радиодиапазоне

В 1986-1989 гг. была предпринята попытка поиска с помощью штатной приемной аппаратуры УТР-2 всплесков звезды *EV Lac* минутной длительности, подобных описанным в [16]. В отдельные ночи 1986-1987 гг. в отклике радиотелескопа появлялись короткие всплески, которые часто объединялись в группы. Они имели следующие особенности:

- их длительности примерно равнялись постоянной времени радиометров ( $\Delta t \approx 3$  с);
- одновременно фиксировались в каналах ON и OFF;
- примерно с одинаковой частотой появлялись на регистраторах в обеих полярностях;
- по времени как совпадали со вспышками, так и не совпадали.

Все эти особенности могут быть объяснены, если предположить, что радиотелескопом принимались короткие всплески длительностью порядка периода переключения фазового модулятора  $0 - \pi$  ( $\sim 0.1$  с). Действительно, в



**Рис. 3.** Вспышка блеска *YZ CMi* в *B*-полосе 04.12.1994 г., зарегистрированная в обсерватории Стефанион (Греция)

этом случае карандашные лучи не формируются, а в зависимости от положения фазового модулятора, (0 или  $\pi$ ), ДН будет представлять собой либо сумму, либо разность диаграмм антенн “С-Ю” и “З-В”.

Присутствие в отклике радиотелескопа звездных всплесков оценивалось статистически. Для этого на временных реализациях отклика радиотелескопа были выделены интервалы, соответствующие длительностям оптических вспышек  $\pm 5$  мин. Затем для каждого сеанса наблюдений были посчитаны средние частоты появления всплесков:  $\nu_{in}$  – в совпадающих со вспышками интервалах, и  $\nu_0$  – вне их.

Оказалось, что обычно величины  $\nu_{in}/\nu_0$  мало отличались от 1 (0.9 ÷ 1.4). Но 12 и 13 сентября



1986 г. это отношение оказалось равным 2 и 3.5 соответственно. Характерно, что в первый из этих дней с 22:40 до 24:40 UT в U-полосе наблюдались три вспышки с амплитудами  $0.5 \div 0.75$  звездных величин, а во второй, в 22:50 UT, – одна из наиболее интенсивных импульсных вспышек обзора с амплитудой 2.8 звездной величины. Вблизи этих вспышек плотности потоков всплесков лежали в пределах  $\approx 90 \div 500$  Ян.

Таким образом, были основания предполагать присутствие 12.09.1986 г. и особенно 13.09.1986 г. в отклике радиотелескопа групп коротких всплесков. Для того чтобы их наблюдать непосредственно, без ухудшения параметров радиотелескопа (пространственного разрешения, чувствительности, помехозащищенности и др.), потребовалось создать более совершенные двухканальные радиометры.

Из полученных в 1992 г. с помощью двухканальных радиометров данных наблюдений, с привлечением описанных в разделе 4 способов отождествления всплесков, с высокой степенью вероятности было выделено четыре события в радиоизлучении EV Lac. Все они имели место в ночь с 1 на 2 сентября и представляли собой группы коротких всплесков. Их плотности потоков  $F$  на соответствующих частотах  $f$ , длительности и спектральные индексы  $\alpha$  приводятся в табл. 2. Положения этих всплесков на кривых блеска звезды отмечены на рис. 1, а их временные профили представлены на рис. 4.

Выделенные всплески 1, 2, 3 (рис. 1) отождествляются по времени со вспышками. Причем важно, что все они наблюдаются на фазе угасания вспышки, в наиболее вероятное время появления всплесковой активности. Безу-

**Таблица 2.** Всплески, отождествляемые с радиоизлучением EV Lac 1 сентября 1992 г.

| № | Время UT  | Частота, МГц | $F_{\text{он}}, \text{ Ян}$<br>max...min | Длительность, с     |                        | $\alpha$ |
|---|---|--------------|--|---------------------|------------------------|----------|
|   |   |              |  | группы<br>всплесков | одиночного<br>всплеска |          |
| 1 | 22 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup> 35 <sup>s</sup> | 25           | 910...230                                | 71                  | <1÷2                   | -2.3     |
|   |   | 20           | 540...380                                |                     |                        |          |
| 2 | 23 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> | 25           | 460...180                                | 9                   | <1÷1.5                 | –        |
| 3 | 23 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> | 25           | 500...250                                | 27                  | <1÷2                   | -3.7     |
|   |   | 20           | 220                                      |                     |                        |          |
| 4 | 24 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> | 25           | 290                                      | 8                   | <1                     | –        |

ловно, среди них с наибольшей вероятностью к звездному излучению принадлежит всплеск 3, который сопровождается самой интенсивной вспышкой обзора. И наоборот, наименьшая вероятность у всплеска 4, который вообще не коррелирует со вспышкой, но по другим формальным критериям его нельзя отнести к помехе.

Наряду с группами коротких всплесков в излучении EV Lac 10.09.1993 г. в 22:40 UT возможно присутствовал протяженный всплеск

длительностью около 2 мин. Он наблюдался в канале ON через  $\approx 8$  мин после максимальной фазы колоссальной импульсной вспышки с амплитудой  $\Delta U = 3.1$  звездной величины (рис. 5). На Солнце такие интенсивные вспышки часто сопровождаются излучением всплесков II типа. Больше того, длительность всплеска и время его задержки относительно максимальной фазы вспышки на звезде хорошо совпадают с подобными событиями на Солнце. Тем не менее, к предположению о

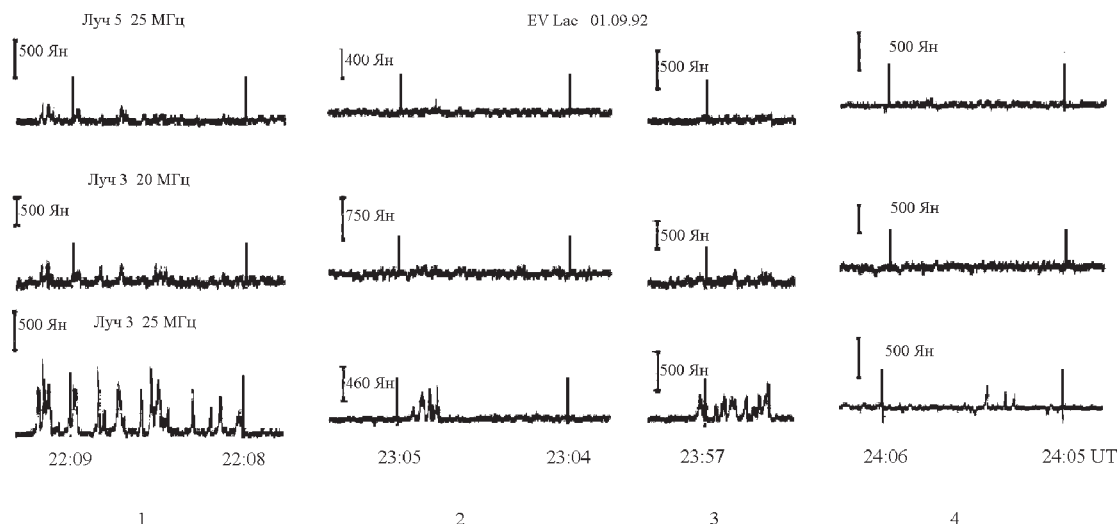


Рис. 4. ДКМ всплески при наблюдениях EV Lac 01.09.1992 г. на УТР-2. Фрагмент записи

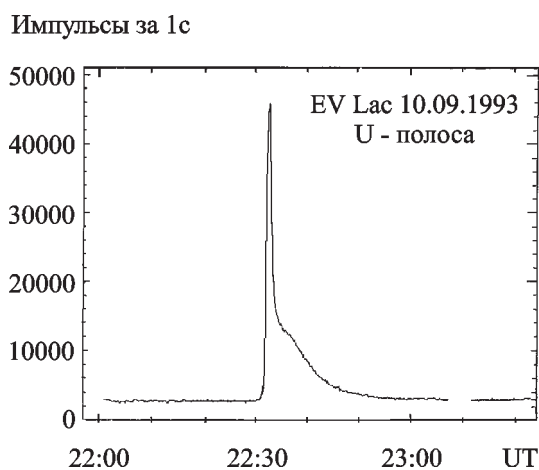


Рис. 5. Вспышка блеска EV Lac в U-полосе 10.09.1993 г. (КрАО)

причастности этого всплеска к излучению EV Lac следует отнестись с осторожностью, так как одновременно с ним в канале OFF присутствует помеха (рис. 6). С другой стороны, есть основания полагать, что отклики в каналах ON и OFF не вызваны одним и тем же сигналом, поскольку коэффициент корреляция между ними не превышает 0.2.

На завершающем этапе обработки данных наблюдений за 1992 г. была предпринята попытка поиска всплесков, которые совпадают по времени со слабыми ( $\Delta U \leq 0.4$  звездной величин)

ны) импульсными вспышками блеска EV Lac, используя последние в качестве реперов. Оказалось, что иногда они коррелируют со слабыми короткими одиночными всплесками с  $F < 100 \div 150$  Ян и длительностями  $< 1$  с, которые зачастую трудно отличить от дисперсии космического фона [29]. Так как на Солнце корреляция вспышек низкой интенсивности со всплесками слабая, то, по аналогии, вероятность звездной природы последних мала. Тем не менее для более уверенной их регистрации была предпринята попытка увеличения чувствительности радиотелескопа путем включения в каналы ON и OFF по одному дополнительному радиометру, которые работали на частоте 25 МГц и имели полосу 300 кГц. Это должно было увеличить флуктуационную чувствительность радиотелескопа примерно в 5 раз по сравнению с используемыми узкополосными ( $\approx 10$  кГц) радиометрами при условии, что мгновенная ширина полосы звездного излучения  $> 300$  кГц. Однако в двух циклах наблюдений в 1997 и 1998 гг. ожидаемый эффект не проявился. Фактически в широкополосном канале только 23.08.1997 г. в 23:18:45 UT был зарегистрирован один всплеск, но измеренная динамическим спектрографом ширина его полосы не превышала 20 кГц. Кроме того, в эту ночь практически отсутствовала вспышечная активность, а на частоте 25 МГц в узкополосном канале всплеск не наблюдался. По этим

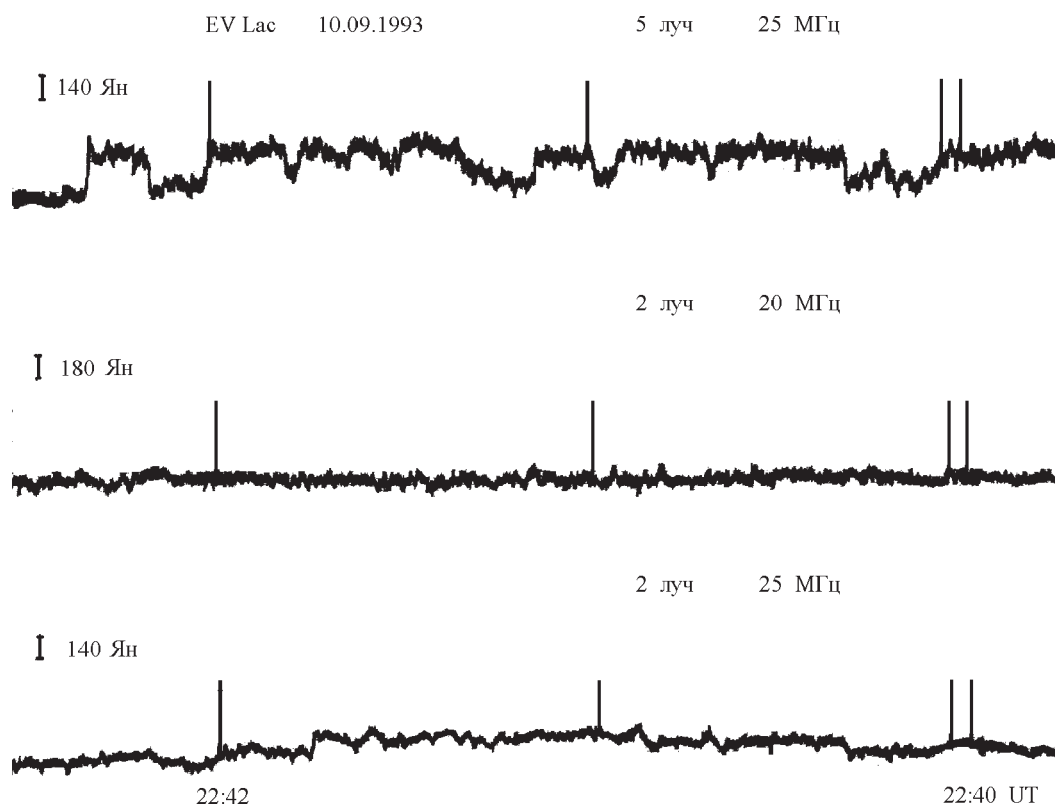


Рис. 6. Фрагмент записи *EV Lac* в ДКМ диапазоне 10.09.1993 г. (УТР-2)

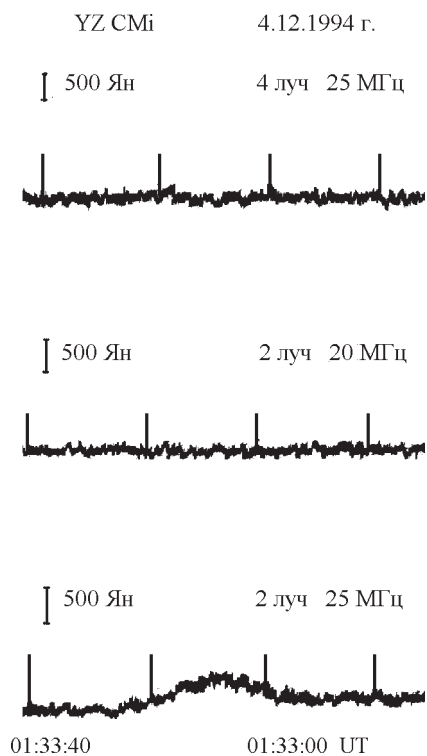
причинам он был признан помехой. Вообще для этих двух циклов наблюдений была характерна низкая вспышечная активность. Достаточно интенсивная вспышка в ультрафиолетовом диапазоне имела место только 11.09.1998 г. в  $\approx 21:55$  UT. Однако осталось неясным, сопровождалась ли она ДКМ излучением, так как в эту ночь по техническим причинам радионаблюдения были начаты позже обычного.

### 5.3. *YZ CMi* на ДКМ волнах

Среди событий, обнаруженных во время радиопатруля вспыхивающей звезды *YZ CMi* [32], на звездное происхождение, вероятнее всего, претендует всплеск, который наблюдался 04.12.1994 г. в канале ON на частоте 25 МГц (рис. 7). Он примерно на 2.5 мин предшествовал появлению вспышки блеска звезды в В-полосе, описанной в разделе 5.1 (см. рис. 3). Помимо того, что этот всплеск по

всем критериям не может быть признан помехой, веским аргументом в пользу его звездной природы является низкая вероятность его случайного совпадения по времени со вспышкой. Действительно, в ночь с 3 на 4 декабря за 2 ч 44 мин совместных наблюдений оптическим и радио- телескопами было зарегистрировано всего лишь по одному событию.

С другой стороны, существует мнение, что наиболее вероятным временем появления всплескового компонента излучения как на Солнце, так и на вспыхивающих звездах, является фаза угасания вспышки. В связи с этим отметим, что перед интенсивными солнечными вспышками, которые нередко сопровождаются выбросами корональных масс, часто в “мягком” рентгеновском и микроволновом диапазоне наблюдается предвестник. Его появление до вспышки достигает десятка минут и сопровождается генерацией элек-



**Рис. 7.** Фрагмент записи YZ CMi в ДКМ диапазоне 04.12.1994 г. (УТР-2)

тронов [33]. Подобный же предвестник был обнаружен за 4.5 мин до интенсивной вспышки на YZ CMi. Причем он наблюдался не только в ультрафиолетовом диапазоне, но и на волне  $\lambda = 6$  см [34]. Кроме того, как уже упоминалось, появление всплескового компонента на стадии возгорания вспышки зачастую регистрировалось и в других наблюдениях звезд [9].

## 6. Обсуждение

Всплески, выделенные как звездные, на волне  $\lambda = 12$  м имеют плотности потоков, заключенные в пределах  $F \approx 200 \div 900$  Ян (табл. 2). На записях радиоизлучения видны изменения потока длительностью  $\sim 1$  с, что дает для характерного размера источника излучения величину порядка радиуса звезды. Обычно принято считать, что радиус источников звездного излучения  $\approx 0.35 R_{\odot}$ .

Тогда их наблюдаемые яркостные температуры будут  $T_B \approx (1.3 \div 5.9) \cdot 10^{18}$  К. Такие величины  $T_B$  указывают на нетепловой механизм радиоизлучения. Огромные яркостные температуры звездных всплесков для своего объяснения требуют привлечения коллективных механизмов излучения. В подобных случаях для метровых и сантиметровых волн обсуждаются два когерентных механизма: электронно-циклотронный мазерный и плазменный.

Из имеющихся в литературе [37] оценок максимально возможных яркостных температур источников ДКМ излучения следует, что при относительной плотности пучка  $\sim 10^{-4}$ , скорости электронов  $\sim 10^{10}$  см/с и при максимальной эффективности трансформации плазменных волн в поперечные наблюдаемая яркостная температура излучения

$$T_i \sim 10^{18} \text{ К.}$$

Это излучение может выходить как из открытых магнитных структур, так и из высоких магнитных арок с высотами  $\sim R_{\odot}$  и с плотностью плазмы  $n = 0.5 \cdot 10^7$  см<sup>-3</sup>.

Имеющиеся в литературе сведения о строении корон Солнца и красных карликовых вспыхивающих звезд [3, 38-42] позволили сделать оценки яркостных температур электронно-циклотронного мазерного излучения (ЭЦМИ), которое генерируется на низких гармониках гирочастоты ( $s = 1 \div 3$ ), а также оптической толщины вышележащих гирорезонансных слоев для этого излучения в дециметровом и метровом диапазонах волн [40, 43-45]. Полученные результаты показывают, что наблюдение ЭЦМИ за пределами звездных корон практически невозможно из-за чрезвычайно сильного поглощения в более высоких гирорезонансных слоях.

Аналогичные оценки для ДКМ диапазона (частота  $f = 25$  МГц) дают практически такой же результат. Так, например, для ЭЦМИ, которое генерируется на третьей гармонике в слое с основным тоном частоты  $f_B \approx 8.3$  МГц и с яркостной температурой  $T_B \sim 10^{21}$  К, на-

блюдаемая яркостная температура не будет превышать  $\sim 10^9$  К из-за поглощения в гирорезонансном слое с  $f \approx 6,25$  МГц, оптическая толщина которого  $\tau \sim 26$  для частоты  $f = 25$  МГц.

Однако в последние годы появились работы, в которых высказываются возражения против такого прямолинейного подхода к оценке поглощения в более высоких гирорезонансных слоях звезд. В некоторых из них указывается на возможность присутствия в слоях примеси надтепловых электронов, которые уменьшают коэффициент поглощения. Численное моделирование прохождения ЭЦМИ через гирорезонансный слой показало, что  $\approx 1\%$  падающего излучения проходит сквозь него вследствие нелинейных эффектов, хотя оцененная в линейном приближении оптическая толщина слоя превышает  $10^3$  [46]. Если это действительно так, то мазерным механизмом излучения можно объяснить наблюдаемые в эксперименте яркостные температуры ДКМ всплесков  $\sim 10^{18}$  К.

## 7. Выводы

1. Тщательный анализ зарегистрированных декаметровых всплесков с помощью независимых методов отбраковки помех выделил несколько событий, которые с большой степенью вероятности имеют звездное происхождение.

2. Между звездными радиовсплесками и оптическими вспышками имеются столь же неоднозначные соотношения, как и между оптическими вспышками и декаметровыми всплесками на Солнце.

3. Имеющиеся данные не позволяют отдать предпочтение одному из возможных когерентных механизмов возбуждения всплесков в звездной атмосфере: плазменным колебаниям или электронно-циклотронному мазеру.

## Литература

1. R. Pallavicini. Radio stars. Proc. Workshop. Eds. R. M. Hyellmig and D. M. Gibson, 1984, 197 p.
2. T. S. Bastian. Solar Phys. 1990, **130**, p. 265.
3. П. Е. Гершберг. Солнечная активность в мире звезд. Москва, Знание, 1990, 64 с.
4. J. H. Swank, H. M. Johnson. Astrophys. J. 1982, **259**, p. L67.
5. B. Lovell, E. L. Whipple, L. H. Solomon. Nature. 1963, **198**, p. 228.
6. B. Lovell. Nature. 1969, **222**, p. 1126.
7. O. B. Slee, C. S. Higgins, C. Roslind, G. Lynga. Nature. 1969, **224**, p. 1087.
8. S. R. Spangler, J. M. Rankin, S. D. Shawhan. Astrophys. J. 1974, **194**, p. L43.
9. S. R. Spangler, T. J. Moffett. Astrophys. J. 1976, **203**, p. 497.
10. D. E. Gary, J. L. Linsky, G. A. Dulk. Astrophys. J. 1982, **267**, p. L79.
11. K. R. Lang, J. A. Bookbinder, L. Golub, M. Davis. Astrophys. J. 1983, **272**, p. L15.
12. T. S. Bastian, J. A. Bookbinder. Nature. 1987, **326**, p. 678.
13. J. A. Bookbinder. Mem. Soc. Astron. It. 1991, **62**, p. 321.
14. P. B. Byrne. Solar Phys. 1989, **121**, p. 61.
15. O. B. Slee, L. H. Solomon, G. E. Patson. Nature. 1963, **199**, p. 991.
16. G. J. Nelson, R. D. Robinson, O. B. Slee. Monthly Notices R. Astron. Soc. 1979, **187**, p. 405.
17. P. D. Jackson, M. R. Kundu, N. Kassim. Solar Phys. 1990, **130**, p. 391.
18. А. В. Мень, Л. Г. Содин, Н. К. Шарыкин, Ю. М. Брук, П. А. Мельяновский, Г. А. Инютин, Н. Ю. Гончаров. Антенны. №26. Москва, Связь, 1978, с. 15.
19. Э. П. Абрагин, Ю. М. Брук, В. В. Захаренко, А. А. Коноваленко. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, **2**, №1, с. 95-102.
20. V. Pirola. Observ. Astrophys. Lab. Univ. Helsinki. Report. 1984, No. 6, p. 151.
21. M. Abada-Simon, A. Lecacheux, P. Louarn, G. A. Dulk, L. Belkora, J. A. Bookbinder, and C. Rosolen. Astron. Astrophys. 1994, **288**, p. 219.
22. S. Kahler, L. Golub, F. R. Harnden. Astrophys. J. 1982, **252**, p. 239.
23. B. M. Haisch, J. L. Linsky, O. B. Slee, B. C. Siegman, I. Nikoloff, M. Candy, D. Harwood, A. Verveer, P. J. Quinn, I. Wilson, A. A. Page, P. Higson, F. D. Seward. Astrophys. J. 1981, **245**, p. 1009.
24. G. J. Nelson, E. D. Robinson, O. B. Slee et al. Monthly Notices R. Astron. Soc. 1986, **209**, p. 91.
25. M. Poquerusse, P. S. McIntosh. Solar Phys. 1990, **130**, p. 101.
26. Г. А. Гурзаян. Звездные вспышки. Москва, Наука, 1985, 558 с.
27. M. Pick. Solar Phys. 1997, **53**, p. 241.

28. Н. Г. Бочкарев. Местная межзвездная среда. Москва, Наука, 1990, 192 с.
29. H. Abdul-Aziz, E. P. Abranin, I. Yu. Alekseev, S. Avgoloupis, L. L. Bazelyan, G. M. Beskin, A. I. Brazhenko, N. N. Chalenko, G. Cutispoto, J. J. Fuensalida, R. E. Gershberg, M. R. Kidger, G. Leto, Yu. F. Malkov, L. N. Mavridis, I. Pagano, I. P. Panferova, M. Rodono, J. H. Seiradakis, S. G. Sergeev, R. E. Spencer, N. I. Shakhovskaya, D. N. Shakhovskoy. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1995, **114**, p. 509.
30. E. P. Abranin, L. L. Bazelyan, I. Yu. Alekseev, R. E. Gershberg, S. Avgoloupis, J. H. Seiradakis, L. N. Mavridis, G. M. Beskin, S. N. Mitronova, I. P. Panferova, M. R. Kidger. *Astrophys. and Space Sci.* 1998, **257**, p. 131.
31. E. P. Abranin, I. Yu. Alekseev, S. Avgoloupis, L. L. Bazelyan, S. V. Berdyugina, G. Cutispoto, R. E. Gershberg, V. M. Larionov, G. Leto, V. N. Lisachenko, G. Marino, L. N. Mavridis, S. Messina, V. N. Mel'nik, I. Pagano, S. V. Pustil'nik, M. Rodono, G. Sh. Roizman, J. H. Seiradakis, G. P. Sigal, N. I. Shakhovskaya, D. N. Shakhovskoy, V. A. Shcherbakov. *Astron. and Astrophys. Trans.* 1998, **17**, p. 221.
32. E. P. Abranin, I. Yu. Alekseev, S. Avgoloupis, L. L. Bazelyan, R. E. Gershberg, V. N. Lisachenko, J. H. Seiradakis. *The Earth and the Universe. Thessaloniki.* 1997, 684 p.
33. B. V. Jackson, K. V. Sheridan, G. A. Dulk, D. J. McLeen. *Proc. Astron. Soc. Australia.* 1978, **3**, No. 3, p. 241.
34. G. H. J. van den Oord, J. G. Doyle, M. Rodono, D. E. Gary, G. W. Henry, P. B. Byrne, J. L. Linsky, B. M. Haisch, I. Pagano, G. Leto. *Astron. Astrophys.* 1996, **310**, p. 908.
35. Э. П. Абранин, Л. Л. Базелян, В. Н. Лисаченко, Я. Г. Цыбко. Достижения и проблемы солнечной радиоастрономии. Труды конференции. Санкт-Петербург. 1998, с. 3.
36. K. V. Subramanian, M. Gopalswamy, C. H. Sastry. *Solar Phys.* 1993, **143**, p. 301.
37. D. V. Melrose. *Solar Phys.* 1989, **120**, p. 369.
38. A. Benz. *Plasma astrophysics: kinetic processes in solar and stellar corona.* Dordrecht. 1993, 299 p.
39. А. В. Степанов. Автореф. дисс... докт. физ.-мат. наук. Горький. 1985, 32 с.
40. T. S. Bastian, J. Bookbinder, G. A. Dulk and M. Davis. *Astrophys. J.* 1990, **353**, p. 265.
41. М. М. Кацова, О. Г. Бадалян, М. А. Лившиц. *Астрон. журн.* 1987, **64**, №6, с. 1243.
42. А. Крюгер. *Солнечная радиоастрономия и радиофизика.* Москва, Мир, 1984, 469 с.
43. В. В. Железняков. *Электромагнитные волны в космической плазме (Генерация и распространение).* Москва, Наука, 1977, 432 с.
44. D. V. Melrose, G. A. Dulk. *Astrophys. J.* 1982, **259**, p. 844.
45. D. V. Melrose. *Solar Radiophysics.* Eds: D. J. McLeen, N. R. Labrum. Cambridge University Press. 1985, 515 p.
46. Г. Д. Флейшман, В. Ф. Мельников. *Успехи физ. наук.* 1998, **168**, №2, с. 1265.

### **Decameter Radioemission from Red Dwarf Flare Stars**

**E. P. Abranin, I. Yu. Alekseev,  
L. L. Bazelyan, A. I. Brazhenko,  
R. E. Gershberg, V. N. Lisachenko,  
N. I. Shakhovskaya**

Observation of DKM sporadic radio emission from red dwarf flare stars during period from 1986 to 1995 is presented. DKM observation of flare stars is accompanied by optical observations in U-band in the Crimean Astrophysical Observatory.

As a result of high level of interference the search of star bursts was carried out by means of different criteria founded on the analysis of spectral, spatial and temporal features of the registered signals.

In 1992 during observation of the star EV Lac four bursts were detected which are with high probability the star bursts. A brightness temperature of these radio bursts was about  $10^{18}$  K.

Some possible mechanisms of origin of such brightness temperature are discussed.