

УДК 524.354.4-77

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕХЧАСТОТНОГО ПАТРУЛИРОВАНИЯ ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ ОТ ПУЛЬСАРА В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

© 2008 г. М. В. Попов<sup>1</sup>, В. А. Согласнов<sup>1</sup>, В. И. Кондратьев<sup>1,2</sup>, А. В. Билоус<sup>1,3</sup>,  
С. В. Сазанков<sup>1</sup>, А. И. Смирнов<sup>1</sup>, Б. З. Каневский<sup>1</sup>, В. В. Орешко<sup>4</sup>, Ю. П. Илясов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Университет Западной Вирджинии, Моргантаун, США

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

<sup>4</sup>Пушчинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра Физического  
института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Пушчино, Россия

Поступила в редакцию 11.01.2008 г.; принята в печать 18.01.2008 г.

Проведено долговременное трехчастотное патрулирование гигантских импульсов от пульсара в Крабовидной туманности на 64-м радиотелескопе в Калязине. Общее время патрулирования составило 160 ч. Регистрировалась мощность сигнала одновременно на частотах 600, 1650 и 4850 МГц в полной полосе приема без компенсации влияния дисперсии радиоволн в межзвездной плазме. Всего было обнаружено 1117 и 352 гигантских импульса на частотах 600 и 4850 МГц, соответственно. Диапазон 1650 МГц, пораженный помехами, использовался только для отождествления событий, обнаруженных в других диапазонах. В результате анализа полученных данных показано, что интегральная функция распределения гигантских импульсов по энергиям на частотах 600 и 4850 МГц следует степенному закону вплоть до самых высоких энергий. Выявлена глубокая модуляция радиоспектров индивидуальных гигантских импульсов как на крупных частотных масштабах ( $\Delta\nu/\nu \approx 0.5$ ), так и на малых ( $\Delta\nu/\nu \approx (2-4) \times 10^{-3}$ ). Одновременное появление гигантских импульсов на долготях интеримпульса на высоких и низких радиочастотах указывает на их общее происхождение, несмотря на наблюдаемые различия в других параметрах.

PACS: 97.60.Gb, 95.85.Vh

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Некоторые пульсары излучают радиоимпульсы, у которых пиковая плотность радиопотока в десятки тысяч раз превышает пиковую плотность потока регулярных импульсов. Такие мощные всплески получили название гигантских импульсов (ГИ). Хотя в последнее время появились сообщения об обнаружении аномально сильных индивидуальных импульсов от целого ряда пульсаров (в работе Кузьмина [1] имеется библиография по этим исследованиям), свойства ГИ изучены в достаточной мере только у двух пульсаров: у пульсара в Крабовидной туманности В0531+21 (см., например, работу Кордеса с соавторами [2]) и у миллисекундного пульсара В1937+21 (см. наиболее позднее исследование Согласнова с соавторами [3]). Основными свойствами ГИ являются: (1) высокая пиковая плотность потока радиоизлучения, превышающая в отдельных случаях миллион янских [2,

4]; (2) короткая длительность (обычно несколько микросекунд), сопровождающаяся наличием отдельных всплесков с длительностью короче 2 нс [5]; (3) степенной закон распределения по энергиям с показателем степени, зависящим от длительности импульсов и от частоты наблюдений [2, 6]; (4) высокая направленность излучения, которая следует из узкой долготной локализации ГИ; (5) высокая степень поляризации ГИ [4, 5, 7, 8]. Для ГИ от пульсара в Крабовидной туманности Хэнкинс и Эйлек [9] также обнаружили сложную структуру радиоспектра с характерными квазипериодическими полосами для ГИ на долготах интеримпульса, по крайней мере, на высоких частотах. Такие свойства указывают на то, что ГИ связаны непосредственно с фундаментальными квази-резонансными процессами генерации радиоизлучения в магнитосфере нейтронной звезды. Изучение свойств ГИ, таким

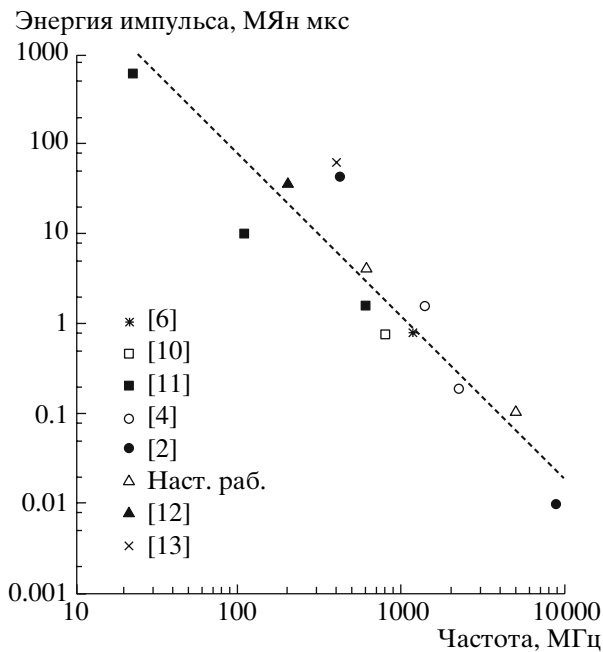


Рис. 1. Энергия самых ярких ГИ, обнаруженных на разных частотах. Разными значками отмечены данные разных публикаций.

образом, дает ценную информацию для понимания природы механизма радиоизлучения пульсаров.

Обратимся, прежде всего, к основному свойству ГИ, которое и обусловило их название, к высокой интенсивности излучения. На рис. 1 мы представили выбранные из публикаций разных авторов измерения самых мощных ГИ, обнаруженных от пульсара в Крабовидной туманности на различных частотах. Так как при переходе к низким частотам из-за рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы изначально короткие ГИ размываются и уменьшаются по пиковой плотности потока радиоизлучения, то мы представили на рисунке интенсивность, проинтегрированную по длительности импульса. Эта величина представляет собой спектральную плотность потока энергии импульса, но для краткости изложения мы будем называть ее просто энергией импульса и измерять в единицах МЯн·мкс (миллион янских за микросекунду). Таким образом, значения, приведенные на рис. 1, показывают, какую плотность потока радиоизлучения имел бы самый мощный из обнаруженных ГИ, если бы он имел длительность в 1 мкс. На самом деле, микросекундная длительность является вполне типичной для ГИ от пульсара в Крабовидной туманности на высоких частотах, где они не искажены влиянием рассеяния, хотя среди самых ярких ГИ часто встречаются примеры с длительностью меньше микросекунды [4]. Прямая линия на рис. 1 соответствует степенной зависимости по частоте с показателем степени  $-1.8$ .

Особенно сильные импульсы были обнаружены на частоте 408 МГц на радиотелескопе “Северный крест” в Медичине с использованием когерентного дедисперсора реального времени [13], и на частоте 430 МГц на 305-м радиотелескопе в Аресибо [2]. Эти импульсы имеют пиковую плотность потока в одну треть миллиона янских при наблюдаемой длительности в несколько сотен микросекунд. Кордес с соавторами [2] даже предложили рассматривать такие импульсы как представителей новой популяции сверхгигантских импульсов, так как они выпадали из общего распределения ГИ по пиковой плотности потока. Чтобы более подробно исследовать распределение по энергиям для высокоэнергичных ГИ, мы организовали долговременное патрулирование ГИ от пульсара в Крабовидной туманности одновременно на частотах 600, 1650 и 4850 МГц на 64-м радиотелескопе в Калязине [14].

В разделах 2 и 3 настоящей работы описывается методика проведения наблюдений и поиска гигантских импульсов. Раздел 4 содержит результаты патрулирования ГИ на разных частотах, обсуждается структура радиоспектров гигантских импульсов. В разделе 5 мы приводим распределение ГИ по энергиям на разных частотах, и в разделе 6 суммируем полученные результаты патрулирования.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Из-за дисперсии радиоволн в межзвездной среде, вызванной наличием в ней свободных электронов, низкие частоты запаздывают относительно высоких. Время запаздывания дается формулой [15]

$$t [c] = \frac{DM}{2.410 \times 10^{-4} (\nu [MГц])^2}, \quad (1)$$

где DM — мера дисперсии, которую мы приняли равной  $56.76 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Формула (1) дает связь между временем прихода импульса и частотой. Каждому моменту (отсчету по) времени можно сопоставить значение частоты. Хотя шкала частот получается при этом неравномерной, при  $\Delta\nu/\nu \ll 1$  линейное приближение вполне достаточно для наших целей. В дальнейшем мы пользовались соотношением [15]

$$\nu [MГц] = \nu_0 - 1.205 \times 10^{-4} \frac{\nu_0^3}{DM} dt [c], \quad (2)$$

где  $\nu_0$  — значение частоты для верхней границы полосы приема в МГц, а  $dt$  — интервал времени от момента появления импульса пульсара на частоте  $\nu_0$ .

Бесконечно короткий импульс (дельта-функция), пройдя через толщу межзвездной среды,

Таблица 1. Параметры приемной системы

Частота, МГц	$T_{\text{экв}}$ , Ян	Полоса, МГц	$\Delta t_{\text{ДМ}}$ , мс	$E_{\text{мин}}$ , кЯн мкс	$E_{\text{макс}}$ , кЯн мкс	$N$
600	1200	5	10	320	4000	1117
1650	950	80	8.5	40	—	—
4850	600	200	0.8	5	100	352

прорисует на выходе форму полосы приемника, при этом его длительность будет соответствовать времени прохождения этой полосы. Форма и длительность реального импульса, наблюдаемого на частоте  $\nu$  в полосе  $\Delta\nu$ , будет сверткой исходной формы импульса и формы полосы приемника, взвешенной со спектром радиоизлучения пульсара. Существует несколько методов компенсации дисперсионного запаздывания, позволяющие восстановить исходную форму импульсов. Так как наши наблюдения были нацелены на измерение энергии очень сильных ГИ, то мы применяли прямое детектирование мощности сигнала во всей полосе приема без какой-либо компенсации. Для этой цели использовался многоканальный детектор, созданный в АКЦ ФИАН в Отделе наземных приемно-передающих комплексов. Прибор имеет 8 каналов, осуществляющих детектирование в полосе 30–1000 МГц и усиление продетектированного сигнала с постоянной времени 20 мкс. Данные с выходов многоканального детектора преобразовываются в 14-разрядный двоичный код с помощью платы АЦП L-761 и записываются на жесткий диск персонального компьютера под управлением программы “PowerGraph”. Записанный таким образом сигнал регистрирует не только мощность ГИ, но также содержит некоторую информацию о его длительности и спектре радиоизлучения. Этим обстоятельством мы воспользуемся при анализе полученных данных в подразделе 4.3.

Радиотелескоп в Калязине оборудован широкодиапазонным рупорным облучателем. Мы использовали одну из возможных комбинаций частот для одновременных наблюдений: 600, 1650 и 4850 МГц. Использовались штатные транзисторные маломощные усилители. Принятый сигнал подвергался фильтрации, гетеродинированию и усилению на промежуточной частоте в фокальной кабине телескопа. Далее этот сигнал передавался по кабелям в лабораторное помещение, где он детектировался и оцифровывался. Основные параметры приемно-регистрирующей системы содержатся в табл. 1.

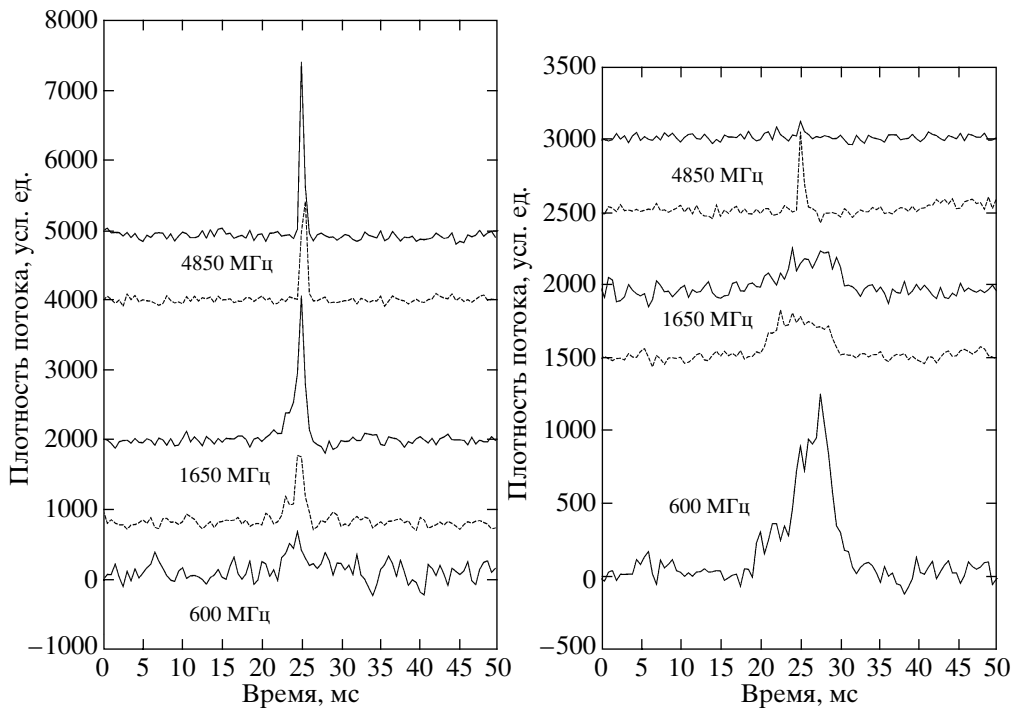
В табл. 1 для каждой частоты приведены значения эквивалентной шумовой температуры системы с учетом вклада от Крабовидной туманности,

который, в основном, и определяет чувствительность. Данные по спектру туманности взяты из работы Битенгольца с соавторами [11]. На частоте 4850 МГц телесный угол диаграммы направленности телескопа ( $3'$  в сечении по уровню двухкратного ослабления) составляет лишь  $2/3$  от телесного угла Крабовидной туманности, что обеспечивает некоторый выигрыш в чувствительности. В третьем столбце таблицы указана полоса приема, в которой осуществлялось детектирование сигнала. На частоте 600 МГц эта полоса специально ограничена для исключения помех. На частоте 1650 МГц такого фильтра не было, и этот диапазон поражен импульсными помехами. На частоте 4850 МГц, даже в широкой полосе, заметные помехи встречались лишь эпизодически (не более 1% наблюдательного времени). Величина  $\Delta t_{\text{ДМ}}$  представляет собой время прохождения импульса через полосу приема вследствие дисперсии радиоволн в межзвездной плазме.

Наблюдения проводились с июля по декабрь 2006 г. Общее наблюдательное время составило 160 ч, или почти 17 миллионов периодов пульсара. На частотах 4850 и 1650 МГц регистрация сигнала осуществлялась в двух каналах с ортогональной круговой поляризацией (RCP и LCP), а на частоте 600 МГц регистрировался сигнал только в одном канале с правой круговой поляризацией (RCP). По отдельному (6-му) каналу АЦП регистрировался выход 10-с меток, выдаваемых службой времени обсерватории. Этот сигнал использовался при обработке для точной временной привязки обнаруженных ГИ; грубая привязка системы опроса каналов АЦП осуществлялась по внутренним часам компьютера, устанавливавшихся оператором с точностью около 1 с. Таким образом, всего регистрировалось 6 каналов с частотой опроса 20 кГц по каждому каналу. Запись данных осуществлялась 15-мин сканами с перерывами между сканами в 1 с; такие перерывы были обусловлены требованием управляющей программы “PowerGraph”.

### 3. ПОИСК ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ

На предварительном этапе обработки данных поиск ГИ проводился путем выделения событий,



**Рис. 2.** Примеры гигантских импульсов, обнаруженных одновременно на трех частотах. Сплошная линия соответствует каналу с правой круговой поляризацией (RCP), штриховая — с левой (LCP). На левом графике изображены гигантские импульсы, появившиеся на долготе интеримпульса, на правом — на долготе главного импульса.

превышающих уровень  $6\sigma$  на записях, усредненных по двум поляризационным каналам и по времени, соответствующему времени прохождения импульса через полосу приема на данной частоте. После того, как было обнаружено несколько десятков ГИ в каждом частотном канале, мы провели обработку повторно по другой методике. Во-первых, были определены фазы прибытия импульсов, соответствующие главному импульсу среднего профиля и интеримпульсу. В дальнейшем только события в этих ограниченных долготных интервалах рассматривались как кандидаты в ГИ. Во-вторых, для каждого частотного и поляризационного канала был сформирован шаблон («средний профиль»), который в сущности представляет собой временную развертку амплитудно-частотной характеристики по мощности. Теперь вместо простого усреднения мы вычисляли функцию корреляции (ФК) сигнала с шаблоном, нормированным таким образом, что амплитуда ФК соответствовала пиковой амплитуде ГИ, а на участке постоянного сигнала ФК имела значение, математическое ожидание которого равно нулю. Это позволяло отфильтровать медленные вариации и короткие всплески. Вычисления проводились отдельно по поляризационным каналам, так как они имели различную амплитудно-частотную характеристику, но результаты вычисления ФК усреднялись по двум каналам

для улучшения чувствительности. Выделение импульсов проводилось в указанных выше долготных интервалах по уровню  $6\sigma$  на фоне флуктуаций ФК, усредненных по двум поляризационным каналам. Величины энергии минимально-обнаружимых ГИ ( $E_{\min}$ ) указаны в табл. 1. Всего на частоте 600 МГц было обнаружено 1117 импульсов, а на частоте 4850 МГц — 352. На частоте 1650 МГц из-за большого количества импульсных помех поиск ГИ не проводился, но каналы RCP и LCP диапазона 1650 МГц использовались достаточно эффективно для подтверждения наличия или отсутствия ГИ, соответствующих событиям, обнаруженным на частотах 600 или 4850 МГц.

#### 4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСЫ НА РАЗНЫХ ЧАСТОТАХ И ИХ РАДИОСПЕКТРЫ

##### 4.1. Гигантские импульсы на долготе интеримпульса

На рис. 2 дается пример двух ГИ, появившихся одновременно во всех трех частотных диапазонах. Интересно отметить, что левый рисунок относится к ГИ, появившемуся на долготе интеримпульса! Дело в том, что средний профиль исследуемого пульсара проявляет удивительную эволюцию с частотой, неизвестную ни для какого-либо другого

пульсара. На частотах около 3 ГГц исчезает интеримпульс, который появляется снова на частоте 4.8 ГГц со смещением по долготе почти на  $10^\circ$  [16]. Одновременно с этим смещением интеримпульса, на частотах выше 3 ГГц, возникают новые компоненты среднего профиля, расположенные между интеримпульсом и главным импульсом. Эти компоненты были названы Моффеттом и Хэнкинсом [16] HFC1 и HFC2. Хэнкинс и Эйлек [9] показали, что на частотах от 4.5 до 10.5 ГГц ГИ, возникающие на долготях главного импульса, сильно отличаются от ГИ на долготях интеримпульса как по форме, так и по свойствам радиоспектра. ГИ на долготях интеримпульса имеют плавный временной ход длительностью в несколько микросекунд, а спектры этих импульсов всегда показывают удивительную регулярную “полосатую” структуру с расстоянием между основными полосами, удовлетворяющим соотношению  $\delta\nu/\nu \simeq 0.06$ . ГИ в главном импульсе часто состоят из коротких выбросов, ограниченных по спектру пятнами с шириной  $\delta\nu/\nu \simeq 0.1$ , но без какой-либо регулярной структуры. Такие кардинальные отличия в свойствах ГИ заставили Хэнкинса и Эйлек [9] сделать интересное предположение о том, что высокочастотные ГИ ( $\nu > 3$  ГГц) на долготях интеримпульса возникают в каком-то другом месте магнитосферы нейтронной звезды, отличном от места происхождения ГИ интеримпульса на низких частотах. Пример ГИ на рис. 2, принадлежащего интеримпульсу и случившегося одновременно на всех трех частотах подвергает сильному сомнению упомянутое выше предположение о независимом происхождении таких ГИ. Из 1117 ГИ на частоте 600 МГц только 140 соответствуют долготе интеримпульса, а из 352 ГИ, обнаруженных на частоте 4850 МГц, 37 импульсов принадлежат интеримпульсу. При такой частоте детектирования ГИ на долготе интеримпульса вероятность случайного совпадения двух независимых событий в одном и том же импульсе составляет  $3 \times 10^{-4}$ , тогда как в нашем мониторинге было обнаружено еще 8 совпадений интеримпульсных ГИ, кроме примера, показанного на рис. 2.

#### 4.2. Крупномасштабная структура радиоспектра ГИ

Как уже отмечалось в разделе 3, поиск ГИ проводился только на частотах 600 и 4850 МГц, а запись на частоте 1650 МГц использовалась для отождествления ГИ, обнаруженных на других частотах. Также мы проводили взаимные отождествления событий и между частотами 600 и 4850 МГц. Для такого отождествления использовался пониженный критерий присутствия ГИ на вспомогательной частоте при соответствующем временном

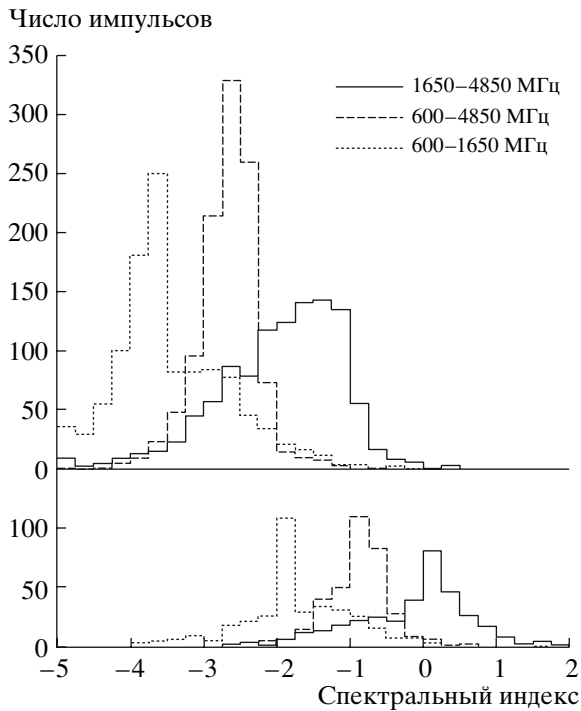
**Таблица 2.** Результаты отождествления ГИ на разных частотах

Комбинация частот, МГц	Частота, МГц	
	600	4850
600/1650/4850	52	65
600/1650	189 (–2.7)	(–2.0)
1650/4850	(–1.9)	37 (–1.3)
600/4850	20 (–2.3)	33 (–1.7)
Всего	1117	352

сдвиге, а именно, уровень  $3\sigma$ , относительно флуктуаций ФК, просуммированной по двум поляризационным каналам. На частоте 600 МГц у нас был только один поляризационный канал. Результаты такого отождествления показали, что из 352 ГИ, обнаруженных на частоте 4850 МГц, 65 импульсов сопровождалось радиовсплесками, превышающими контрольный уровень  $3\sigma$  на частотах 1650 и 600 МГц одновременно. Вероятность даже одного такого случайного отождествления составляет величину  $6 \times 10^{-4}$ . Далее, 37 ГИ из 352 наблюдались также на частоте 1650 МГц, но отсутствовали на частоте 600 МГц. Наконец, 33 импульса были обнаружены одновременно на частотах 4850 и 600 МГц, но не наблюдались на частоте 1650 МГц. Ожидаемое число случайных парных отождествлений составляет 0.5, т.е. подавляющее большинство этих парных отождествлений являются реальными ГИ, проявившимися одновременно на двух частотах.

Теперь приведем результаты отождествления ГИ, отдельно обнаруженных на частоте 600 МГц. Таких событий у нас было 1117. Из них на всех трех частотах наблюдалось 52 импульса, только на частотах 600 и 1650 МГц — 189 импульсов, а на частотах 600 и 4850 МГц — всего 20 импульсов. Все эти данные приведены в табл. 2.

В первом столбце табл. 2 указана комбинация частот, для которых проводились отождествления. Следующий столбец дает отождествления для ГИ, обнаруженных на частоте 600 МГц, а последний — для импульсов, первоначально обнаруженных на частоте 4850 МГц. В скобках приведены значения спектрального индекса для ГИ, находящихся на пределе обнаружения для данной комбинации частот. Например, во втором столбце, в строке, соответствующей отождествлениям ГИ, обнаруженных на частоте 600 МГц, с событиями, наблюдавшимися на частоте 1650 МГц, приведенные в таблице числа отождествленных импульсов относятся



**Рис. 3.** Распределение спектральных индексов для ГИ, обнаруженных на частоте 4850 МГц (нижний график) и 600 МГц (верхний график). Сплошная линия показывает распределение спектральных индексов между частотами 1650 и 4850 МГц, штриховая линия с длинным штрихом соответствует частотам 600 и 4850 МГц, а штриховая линия с коротким штрихом — частотам 600 и 1650 МГц.

именно к указанной комбинации частот. Например, 189 отождествлений между частотами 600 и 1650 МГц не включают в себя 52 отождествления, попавшие в категорию трехчастотных. Рядом с числом отождествлений (189) в скобках указано значение спектрального индекса (−2.7). Это означает, что для слабых импульсов на частоте 600 МГц (таких импульсов большинство) спектральный индекс должен быть менее крутой, чем −2.7, а импульсы с более крутыми спектральными индексами будут ненаблюдаемыми на частоте 1650 МГц. Для спектральных индексов, приведенных в третьем столбце табл. 2, наоборот, слабые ГИ, обнаруженные на частоте 4850 МГц, могут наблюдаться на частоте 1650 МГц, если их спектральный индекс более крутой, чем значение −1.3.

Здесь и далее в данной работе мы используем традиционное формальное определение спектрального индекса, который удобно использовать при сравнении измерений плотности потока радиоизлучения  $S_1$  и  $S_2$  на двух частотах  $\nu_1$  и  $\nu_2$ ,

$$\alpha = \frac{\lg S_1 - \lg S_2}{\lg \nu_1 - \lg \nu_2},$$

хотя в заключении нашей работы будет показано, что спектры ГИ совсем не следуют степенному закону  $S \propto \nu^\alpha$  между частотами, на которых проводились наблюдения.

Так как в нашем распоряжении для каждого ГИ, обнаруженного на той или иной частоте, имеется запись сигнала на других частотах, то мы можем построить формальное распределение спектральных индексов для всех обнаруженных ГИ. При этом мы сделали следующее допущение: проверяемым событиям, отклик которых (величина ФК) составлял по амплитуде значение меньше среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ), приписывалось значение, равное  $\sigma$ . Полученные таким образом распределения спектральных индексов приводятся на рис. 3. В нижней части этого рисунка даются распределения спектральных индексов для выборки ГИ, обнаруженных на частоте 4850 МГц, а в верхней части — для ГИ, обнаруженных на частоте 600 МГц. При этом сплошная линия обозначает распределение спектральных индексов между частотами 1650 и 4850 МГц, штриховая линия с длинными штрихами — между частотами 600 и 4850, а штриховая линия с короткими штрихами — между частотами 600 и 1650. Из рисунка видно, что распределения сильно отличаются для двух представленных выборок ГИ, а именно, ГИ, обнаруженные на высокой частоте, имеют менее крутые спектральные индексы, чем ГИ, обнаруженные на низкой частоте. Внутри каждой выборки самые крутые спектральные индексы получаются между частотами 600 и 1650 МГц, а между частотами 1650 и 4850 МГц для выборки ГИ, открытых на высокой частоте, вообще, почти половина импульсов имеют положительные спектральные индексы.

Несмотря на то, что некоторые черты представленных распределений обусловлены селекционными эффектами (например, резкий максимум при значении −2 в распределении для комбинации частот 600/1650 на нижнем рисунке совпадает с оценкой спектрального индекса для слабых импульсов, приведенной в табл. 2), все-таки можно сделать некоторые заключения о свойствах радиоспектров индивидуальных ГИ в диапазоне частот 600–5000 МГц: (1) спектры ГИ в этом диапазоне частот нельзя представить единой степенной функцией или даже степенной функцией с изломом; (2) спектры ГИ в среднем уплощаются к высоким частотам; (3) спектры ГИ имеют крупномасштабные неравномерности с характерным масштабом  $\Delta\nu/\nu \approx 0.5$ . Последнее утверждение нуждается в разъяснении. Во-первых, из 1117 ГИ, открытых на частоте 600 МГц, 856 импульсов (т.е. более трех четвертей) не сопровождаются заметными всплесками на других частотах. Это еще можно объяснить предположением, что их спектры равномерные, но спектральные индексы круче, чем

–2.7. Тогда обратимся к ГИ, первоначально обнаруженным на частоте 4850 МГц. Из 352 импульсов 217 событий, т.е. более половины, не подтверждаются всплесками на других частотах. У таких импульсов спектральные индексы должны быть менее крутые, чем  $-1.3$ , что противоречит данным, сформулированным в предыдущем предложении. Наконец, решающим указанием на присутствие крупномасштабных неравномерностей в спектрах индивидуальных ГИ является наличие достаточно большого количества импульсов, появляющихся одновременно на крайних радиочастотах 600 и 4850 МГц и отсутствующих на средней частоте 1650 МГц. Таких событий было 20 и 33 для ГИ, первоначально обнаруженных на частотах 600 и 4850 МГц, соответственно. Таким образом, полоса крупномасштабных неравномерностей в спектре индивидуальных ГИ больше полосы приема на каждой частоте, но меньше расстояния между нашими частотными каналами. Предположение о возможном наличии крупномасштабных неоднородностей в радиоспектрах индивидуальных ГИ от пульсара в Крабовидной туманности выдвигалось ранее в работе Попова с соавторами [17]. Подобное заключение было сделано и относительно ГИ от миллисекундного пульсара В1937+21 Поповым и Стапперсом [18].

#### 4.3. Мелкомасштабная частотная структура ГИ

Как уже обсуждалось в разделе 2, индивидуальные ГИ движутся (дрейфуют) по частоте, и, таким образом, зарегистрированный после детектора сигнал отражает спектр данного ГИ. На рис. 4 дается пример записи сильного ГИ на частоте 600 МГц с полным временным разрешением 50 мкс, причем временная шкала обращена во времени и оцифрована в частотах в соответствии с формулой (2). Для этого частотного диапазона скорость свипирования импульса составляла 23 кГц на одну точку временного отсчета, т.е. формальное спектральное разрешение оказывается равным 46 кГц. Для частот 1650 и 4850 МГц такое спектральное разрешение равно 1 и 22 МГц, соответственно. Однако существует еще одно ограничение спектрального разрешения нашего метода, обусловленное конечной длительностью импульса. На частоте 600 МГц эта длительность обусловлена рассеянием радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы и составляет около 50 мкс по данным Попова с соавторами [12]. Тогда по формуле (2) собственная полоса импульса составит 230 кГц, и именно эта величина будет определять частотное разрешение для диапазона 600 МГц. Значения собственной полосы импульса для диапазонов 1650 и 4850 МГц приведены в табл. 3. Из рис. 4 видно, что ГИ обрисовывает форму полосы приема ( $B \approx 5$  МГц) и

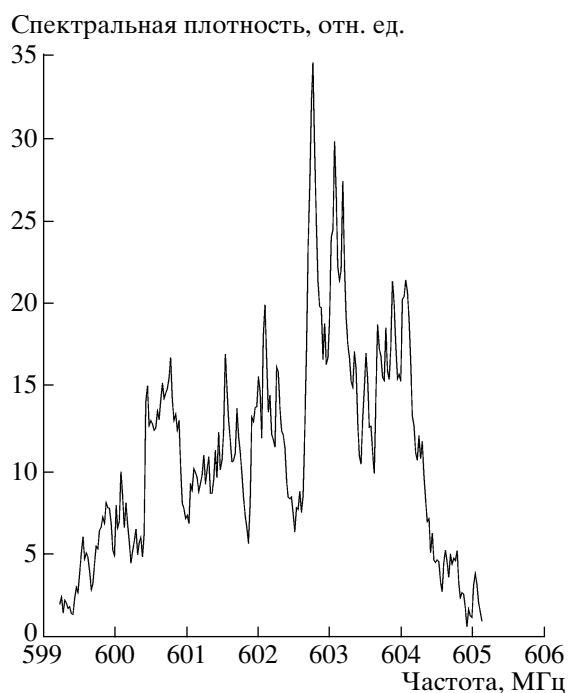


Рис. 4. Оригинальная запись ГИ на частоте 600 МГц, отражающая прохождение импульса через полосу приемника. Для наглядности время обращено в обратную сторону, и ось абсцисс оцифрована в МГц.

показывает богатую структуру собственного спектра. Эта структура может быть обусловлена дифракционными искажениями, вызванными рассеянием радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы. Воспользуемся измерениями полосы декорреляции этих искажений, выполненными на частоте 2244 МГц Кондратьевым с соавторами [19]. Авторы использовали синхронные наблюдения в полосе 16 МГц на радиотелескопах в Калязине и в Алгонкине (Канада) и определяли полосу декорреляции путем кросс-корреляции радиоспектров, полученных в двух пунктах наблюдений, исключая, таким образом, вклад собственных шумов и неравномерностей полосы приема. Они выделили два частотных масштаба 50 и 500 кГц с примерно равной глубиной модуляции. В работе [17] для частотной зависимости характерного времени рассеяния получено значение показателя степени  $-3.5$ . Базируясь на этих данных, мы можем сделать предсказания относительно ожидаемых значений для полосы декорреляции на наших частотах. Результаты приведены в табл. 3.

В строке “Ожидаемые дифракционные полосы” мы привели оба значения из работы [19], экстраполированные на наши частоты. Воспользуемся записями наиболее сильных ГИ для анализа структуры их радиоспектра. На рис. 5 дается два примера спектров ГИ на частоте 4850 МГц, полученных

Таблица 3. Параметры обнаруженных спектральных деталей

Параметр	Частота, МГц		
	600	1650	4850
Ожидаемые дифракционные полосы, кГц	0.5, 5.0	17, 170;	700, 7000
Измеренная полоса (полуширина, кГц)	150	3000	20 000
Спектральное разрешение, кГц	46	1000	22 000
Собственная полоса, кГц	230	14	8
Число спектральных каналов	200	160	20
Число импульсов	8	13	16

путем перевода временной записи в спектральную. Темные квадратики показывают спектр для канала с правой круговой поляризацией, а светлые — для канала с левой круговой поляризацией. Обе кривые были исправлены индивидуально за неравномерность амплитудно-частотной характеристики приемной системы, разную для разных поляризационных каналов. Хорошая корреляция между кривыми для разных поляризационных каналов подчеркивает значимость наблюдаемых спектральных деталей. Рис. 6 показывает средние автокорреляционные функции (АКФ) для наблюдаемых вариаций спектра мощности внутри полосы приема на частоте 4850 МГц (левый график). На этом же графике показана кросс-корреляционная функция (ККФ) между вариациями спектральной плотности в двух поляризационных каналах. Максимум ККФ сдвинут от начала координат из-за имеющегося сдвига амплитудно-частотных характеристик приемника. Полуширина ККФ составляет около 20 МГц. В АКФ и ККФ имеется и более широкая компонента, но ее полуширина сравнима с шириной полосы приема. ККФ между вариациями спектральной плотности на частоте 1650 МГц в каналах с левой и правой круговой поляризацией приведена на среднем графике рис. 6; полуширина ее узкой детали составляет около 3 МГц. Наконец, на правом графике рис. 6 показана АКФ спектральных флуктуаций для диапазона 600 МГц, где мы имеем только один поляризационный канал. Результаты этих измерений приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что выделенные характерные частотные детали не согласуются по ширине с ожидаемыми значениями для дифракционных мерцаний. В диапазоне 600 МГц истинные узкие дифракционные детали могут быть сглажены собственной полосой частот ГИ. Однако в диапазонах 1650 и 4850 МГц наблюдаемые спектральные детали гораздо шире собственной полосы частот ГИ, и они сравнимы с частотным разрешением, обусловленным шагом

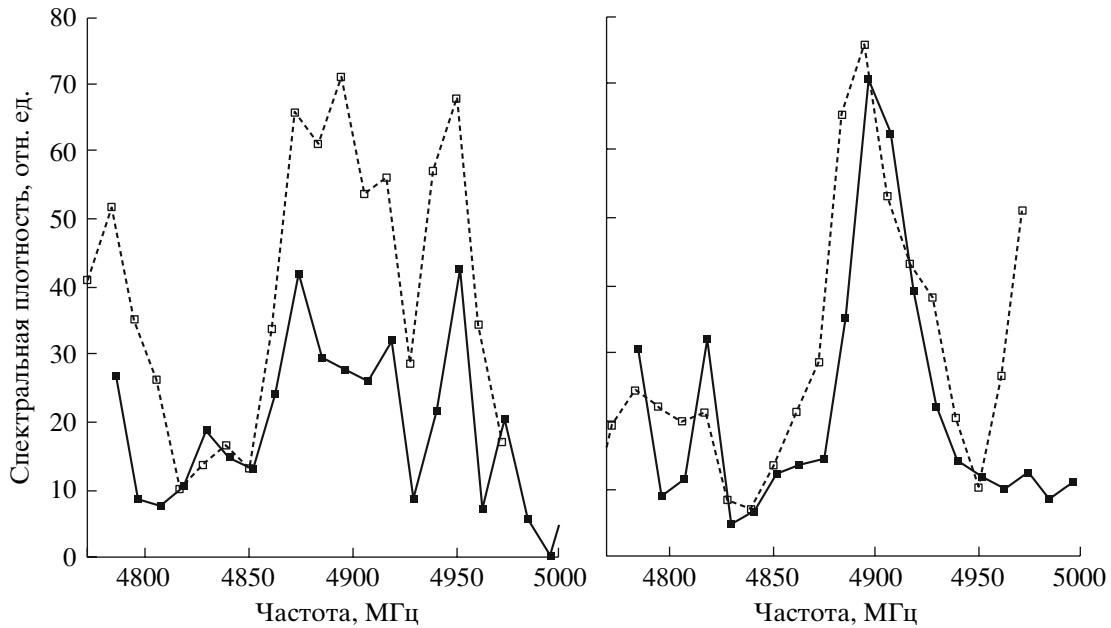
по времени (50 мкс). Мы склонны считать, что найденные в этих диапазонах вариации спектров с характерными полосами, указанными в табл. 3, присущи самим импульсам.

Также интересно напомнить, что измеренные в работе Кондратьева с соавторами [19] дифракционные искажения в спектрах ГИ на частоте 2244 МГц оказались некоррелированными в двух ортогональных каналах с круговой поляризацией, а обнаруженные в данной работе спектральные вариации хорошо коррелируют в поляризационных каналах как на частоте 1650 МГц, так и на частоте 4850 МГц.

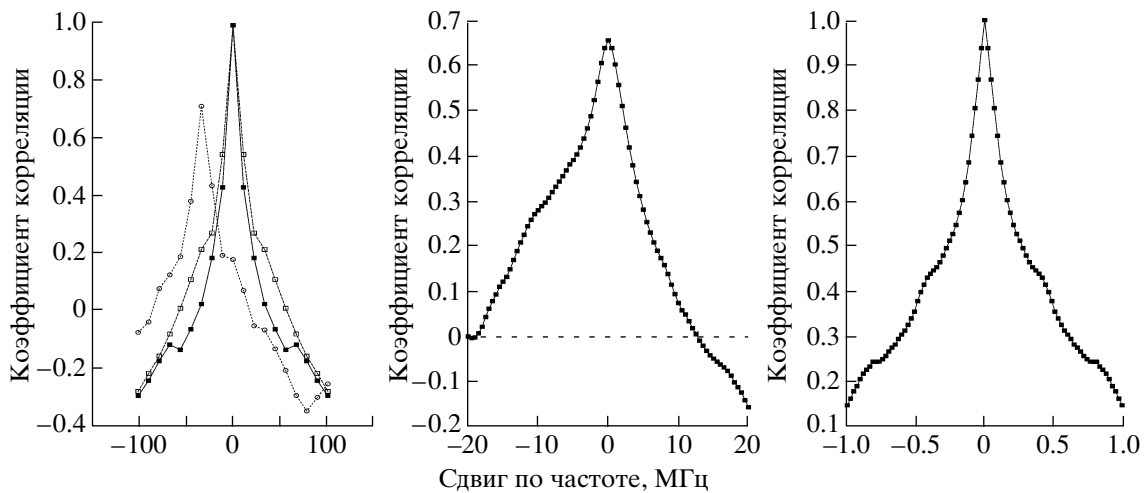
## 5. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ЭНЕРГИЯМ

В табл. 4 дается сводка результатов исследований параметров ГИ от пульсара в Крабовидной туманности, выполненных на разных частотах. В таблице указан радиотелескоп, на котором проводились наблюдения, и общее время наблюдений в часах. Диапазон энергий для каждого исследования представлен величинами  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$ , выраженными в единицах кЯн·мкс. В столбцах 7 и 8 приведены показатели степени для степенной функции, аппроксимирующей интегральное распределение по энергиям для импульсов, возникающих на долготах главного импульса (ГЛИ) и интеримпульса (ИП), соответственно. Под интегральной функцией распределения (ИФР) мы понимаем функцию  $N(E)$ , которая дает число ГИ с энергиями больше  $E$ . В тех исследованиях, где не делалось различия между ГИ, возникающими на долготах главного импульса и интеримпульса, значение показателя степени помещено в столбец 7. При заполнении табл. 4 в некоторых случаях мы вычисляли приведенные величины самостоятельно, основываясь на тексте соответствующей публикации и на иллюстрациях.





**Рис. 5.** Примеры радиоспектров индивидуальных ГИ на частоте 4850 МГц, полученные обращением времени в частоту, как и на рис. 4. Темные квадратики соответствуют каналу с правой круговой поляризацией, светлые квадратики — с левой.



**Рис. 6.** Средние АКФ и ККФ для спектров индивидуальных ГИ. Левый график соответствует частоте 4850 МГц, средний — 1650 МГц, правый — 600 МГц. Темными и светлыми квадратиками представлены АКФ для каналов с правой и левой круговой поляризацией, соответственно, а кружками представлены ККФ между этими каналами. Сдвиг максимума ККФ для частоты 4850 МГц обусловлен существующим сдвигом полос пропускания приемника для этих каналов. На частоте 600 МГц регистрировался только канал с правой круговой поляризацией.

Самый тщательный анализ статистических свойств ГИ от пульсара в Крабовидной туманности был выполнен Поповым и Стапперсом [6] по результатам наблюдений на Вестерборкском радиотелескопе апертурного синтеза на частоте 1200 МГц. В этой работе было показано, что ГИ разной длительности имеют различный по-

казатель степенной функции, аппроксимирующей интегральное распределение ГИ по энергиям. Этот показатель изменяется от  $-1.7$  до  $-3.2$  при переходе от самых коротких ГИ (4 мкс) к самым длинным (64 мкс). В этой же работе было показано, что ИФР для ГИ, обнаруженных на долготях

**Таблица 4.** Сводка результатов исследований параметров ГИ от пульсара в Крабовидной туманности

Частота, МГц	Радиотелескоп	Время, ч	$E_{\min}$ , кЯн мкс	$E_{\max}$ , кЯн мкс	Число ГИ	ГЛИ	ИП	Ссылка
23	УТР-2	12.0	300 000	600 000	45			[17]
111	БСА	0.25	900	17 000	128			[17]
146	Алгонкин	6.0	3200	96 000	440	-2.5	-2.8	[10]
200	MWA-LFD	3.5	3000	15 000	31	-1.7		[20]
430	Аресибо	1.0	13	44 000	10 000	-2.3		[2]
600	Калязин	3.0	18	2000	4287	-2.2	-2.2	[12]
600	Калязин	160	320	4000	1117	-2.3		настоящая работа
812	Грин-Бэнк	100	37	800	30000	-2.5		[21]
1200	Вестерборк	3.5	0.6	800	18000	-1.7 -3.2	-1.6	[6]
4850	Калязин	160	5	100	352	-1.8		настоящая работа
8800	Аресибо	3.1	0.07	10	1200	-2.9		[2]

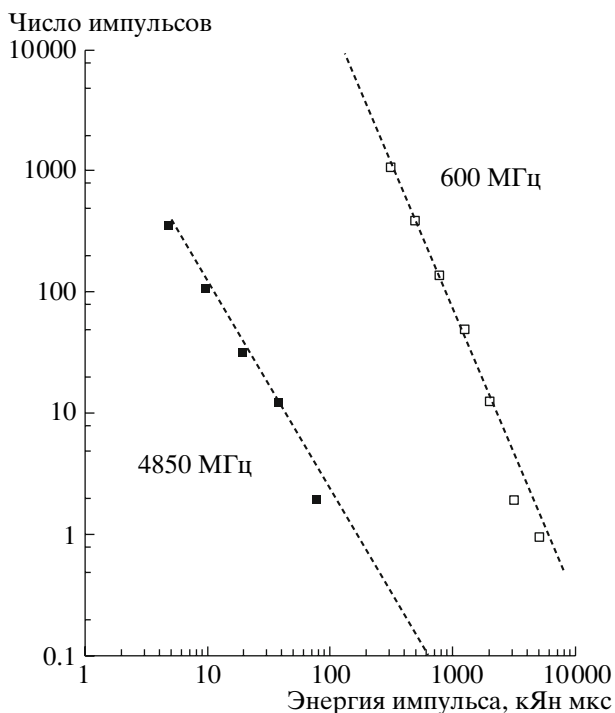
интеримпульса, существенно отличаются от ИФР ГИ на долготах главного импульса, а именно, ИФР для ГИ главного импульса аппроксимиру-

ются степенной функцией со скачком показателя степени при переходе к слабым импульсам, где этот показатель заключен в диапазоне от  $-1$  до  $-2$ . В работе Попова и Стапперса [6] также впервые было показано, что наиболее сильные ГИ являются и самыми короткими по длительности. Эти особенности помогают понять наблюдаемый разброс показателей степени, собранных в табл. 4. Например, небольшое по абсолютной величине значение показателя степени ( $-1.8$ ), полученное на частоте 4850 МГц, можно объяснить тем, что в наших наблюдениях регистрировались только самые сильные ГИ, которые являются и самыми короткими по длительности, а для таких импульсов характерны более низкие величины показателя в аппроксимации ИФР степенной функцией.

ИФР, построенные по результатам нашего патрулирования, показаны на рисунке 7. В данном случае мы объединили вместе ГИ, возникающие на долготах главного импульса и на долготах интеримпульса, из-за недостаточного количества послед-

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главный результат, полученный в данной работе, состоит в том, что в наблюдениях, покрывающих интервал времени в 160 ч, не было обнаружено отклонений ИФР от единой степенной функции в области самых высоких значений энергий ГИ на частотах 600 и 4850 МГц, причем на частоте



**Рис. 7.** Интегральные функции распределения ГИ по энергиям на частотах 4850 МГц (темные квадратики) и 600 МГц (светлые квадратики).

600 МГц диапазон энергий ГИ, на котором выполняется степенной закон для ИФР, охватывает 200-кратный интервал: от 18 до 4000 кЯн-мкс. Такое свойство статистики ГИ имеет большое значение для понимания природы механизма генерации радиоизлучения этих импульсов, как отмечает в своем исследовании Кэйрнс [22].

В результате взаимных отождествлений ГИ, обнаруженных в нашем исследовании на различных частотах, было показано, что радиоспектры индивидуальных ГИ, в широком диапазоне частот (600–5000 МГц), имеют неравномерный характер с глубиной модуляции, близкой к 100% и с характерным масштабом  $\Delta\nu/\nu \approx 0.5$ .

Выявлена мелкомасштабная модуляция радиоспектров ГИ с масштабом 0.15, 3 и 20 МГц на частотах 600, 1650 и 4850 МГц, соответственно. Эти масштабы не согласуются с ожидаемыми значениями для межзвездных мерцаний и отражают, по нашему мнению, реальные свойства радиоспектра ГИ.

Достаточно частые отождествления ГИ, возникающих на долготе интеримпульса на частоте 4850 МГц, с событиями на частотах 600 или 1650 МГц свидетельствуют против предположения Хэнкинса и Эйлек [9] о том, что интеримпульсные ГИ на частотах выше и ниже 3 ГГц возникают в различных областях магнитосферы нейтронной звезды.

Авторы выражают благодарность операторам радиотелескопа в Калязине И.Г. Лукину и С.И. Порочкину за проведение наблюдений по данной программе. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 07-02-00074 и 06-02-16816), а также в рамках государственного контракта 02.452.12.7053-051 с Министерством образования и науки РФ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. D. Kuzmin, *Neutron Stars and Pulsars. 40 years after the discovery*, Proc. of the 363rd WE-Heraeus Seminar, Bad Honnef, Germany, May 14–19, 2006, eds W. Becker and H. H. Huang, MPE Report No. 291, 72 (2007).
2. J. M. Cordes, N. D. R. Bhat, T. H. Hankins, et al., *Astrophys. J.* **612**, 375 (2004).
3. V. A. Soglasnov, M. V. Popov, N. Bartel, et al., *Astrophys. J.* **616**, 439 (2004).
4. V. A. Soglasnov, *Neutron Stars and Pulsars. 40 years after the discovery*, Proc. of the 363rd WE-Heraeus Seminar, Bad Honnef, Germany, May 14–19, 2006, eds W. Becker and H. H. Huang, MPE Report **291**, 68 (2007).
5. T. H. Hankins, J. S. Kern, J. A. Weatherall, and J. A. Eilek, *Nature* **422**, 141 (2003).
6. M. V. Popov and B. Stappers, *Astron. and Astrophys.* (2007, в печати); e-Print arXiv:0704.1197 [astro-ph] (2007).
7. I. Cognard, J. A. Shrauner, J. H. Taylor, and S. E. Thorsett, *Astrophys. J. (Letters)* **457**, L81 (1996).
8. М. В. Попов, В. А. Согласнов, В. И. Кондратьев, С. В. Костюк, Письма в “Астрон. журн.” **30**, 115 (2004).
9. T. H. Hankins and J. A. Eilek, *Astrophys. J.* **670**, 693 (2007).
10. E. Argyle and J. F. R. Gower, *Astrophys. J. (Letters)* **175**, L89 (1972).
11. M. F. Bietenholz, N. Kassim, D. A. Frail, et al., *Astrophys. J.* **490**, 291 (1997).
12. М. В. Попов, В. А. Согласнов, В. И. Кондратьев и др., *Астрон. журн.* **83**, 62 (2006).
13. A. D. Skulachev, V. A. Soglasnov, N. D’Amico, et al., in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev and R. D. Dagkesamanskii (Cambridge: Cambridge Scientific Publishers Ltd., 2007), p. 277.
14. Yu. P. Ilyasov, V. V. Oreshko, and B. A. Poperechenko, in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev, R. D. Dagkesamanskii (Cambridge: Cambridge Scientific Publishers Ltd., 2007), p. 213.
15. A. G. Lyne and F. G. Smith, *Pulsar Astronomy* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006).
16. D. A. Moffett and T. H. Hankins, *Astrophys. J.* **468**, 779 (1996).
17. М. В. Попов, А. Д. Кузьмин, О. М. Ульянов и др., *Астрон. журн.* **83**, 630 (2006).
18. М. В. Попов, Б. Стапперс, *Астрон. журн.* **80**, 717 (2003).
19. V. I. Kondratiev, M. V. Popov, V. A. Soglasnov, et al., *Astron. and Astrophys. Trans.* (2007, in press); e-Print arXiv:astro-ph/0703046 (2007).
20. N. D. R. Bhat, R. B. Wayth, H. S. Knight, et al., *Astrophys. J.* (2007, в печати); e-Print arXiv:0705.0404 [astro-ph] (2007).
21. S. C. Lundgren, J. M. Cordes, M. Ulmer, et al., *Astrophys. J.* **453**, 433 (1995).
22. I. H. Cairns, *Astrophys. J.* **610**, 948 (2004).

## Results of Three-Frequency Monitoring of Giant Pulses from the Crab Pulsar

**M. V. Popov, V. A. Soglasnov, V. I. Kondratiev, A. V. Bilous, S. V. Sazankov,  
A. I. Smirnov, B. Z. Kanevsky, V. V. Oreshko, and Yu. P. Ilyasov**

We present the results of long-term, three-frequency monitoring of giant pulses from the Crab pulsar on the 64-m radio telescope in Kalyazin. The total monitoring time was 160 hours. The signal power was recorded simultaneously at 600, 1650, and 4850 MHz via direct sampling of the received signals in the total receiver bandwidth without any compensation for interstellar dispersion. In total, 1117 and 352 giant pulses were detected at 600 and 4850 MHz, respectively. The frequency band centered at 1650 MHz was contaminated by interference, and was used only to identify events found in other frequency bands. The cumulative energy distribution of the giant pulses follows a power law at 600 and 4850 MHz up to the highest energies. A deep modulation in the radio spectra of individual giant pulses was observed on both large ( $\Delta\nu/\nu \approx 0.5$ ) and small ( $\Delta\nu/\nu \approx (2-4) \times 10^{-3}$ ) frequency scales. The simultaneous appearance of giant pulses at the interpulse longitudes at high (4850 MHz) and low (1650 and/or 600 MHz) frequencies testifies to their common origin, in spite of the observed differences in other parameters.