

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА  
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

УДК 524.52; 524.54; 524.354.2; 524.354.4

Рудницкий Алексей Георгиевич

**ЗОНДИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ПЛАЗМЫ ГИГАНТСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ  
ПУЛЬСАРА В КРАБОВИДНОЙ  
ТУМАННОСТИ**

Специальность 01.03.02 —  
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), г. Москва

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, заведующий отделом космической радиоастрономии, заведующий лабораторией галактической радиоастрономии АКЦ ФИАН  
**Попов Михаил Васильевич**

Официальные оппоненты: **Постнов Константин Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

**Бескин Григорий Меерович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика РФ

Ведущая организация: Институт космических исследований РАН, г. Москва

Защита состоится «10» ноября 2017 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д002.023.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «01» сентября 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Рассеяние радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы от пространственно когерентных источников, каковыми являются пульсары, приводит к многолучевой интерференции, создающей в точке приема дифракционные искажения спектра и интенсивности радиоизлучения [1; 2]. Искажения в спектре пульсаров характеризуются частотным масштабом  $\Delta\nu_d$  (полоса декорреляции). При этом наблюдаемые эффекты рассеяния также зависят от частоты наблюдения.

Благодаря своим сверхкомпактным размерам, пульсары предоставляют широкие возможности для изучения свойств ионизованной плазмы в Галактике путем измерений эффектов рассеяния. Основные свойства рассеяния принято интерпретировать в рамках модели изотропной и однородной турбулентности межзвездной среды с Колмогоровским спектром [3–5]. В результате исследования эффектов рассеяния по наблюдениям пульсаров было показано, что модель однородной среды редко оказывается адекватной. В большинстве случаев подходит модель тонкого рассеивающего экрана [6; 7], указывающая на существование выделенных неоднородностей на луче зрения. На наличие таких неоднородностей межзвездной плазмы указывают явления аномального рассеяния (ESE – extreme scattering events), которые неоднократно наблюдались для компактных внегалактических источников [8–10]. Указания на наличие анизотропии было получено в результате РСДБ наблюдений (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) [11]. Именно РСДБ наблюдения позволяют измерить угловой размер диска рассеяния [12].

Особенные перспективы предоставляет наземно-космический интерферометр «Радиоастрон», обеспечивающий высокое угловое разрешение: до 1 угловой миллисекунды дуги в метровом диапазоне радиоволн (92 см) и 0.2 угловых миллисекунд дуги в дециметровом диапазоне радиоволн (18 см). С помощью этого интерферометра были измерены угловые диаметры диска рассеяния для пульсаров V0329+54, V1641-45, V1749-28 и V1933+16 и определены расстояния до эффективных рассеивающих экранов [13; 14]. В направлении пульсаров V0950+08 и V1919+21 были выявлены близкие к Солнцу слои рассеивающей плазмы (10-100 пк), которые могут быть ответственными за быструю переменность компактных внегалактических источников [15; 16].

После обнаружения наземно-космическим интерферометром «Радио-астрон» субструктуры диска рассеяния пульсара B0329+54 [13], были выполнены аналогичные исследования для центра Галактики Sgr A\* с помощью наземного РСДБ на длине волны 1.3 см [17]. Результаты этих наблюдений подтвердили наличие субструктуры в диске рассеяния и не только у пульсаров, но и у объектов другого класса (например квазары или активные ядра галактик). Учет эффектов рассеяния и дальнейшее их исследование являются очень важными аспектами последующего проведения РСДБ наблюдений не только в радио-, но и в миллиметровом диапазоне. В первую очередь это относится к наблюдениям, выполняемым с помощью инструментов, которые обладают высоким угловым разрешением. К таким инструментам можно отнести, например, Event Horizon Telescope<sup>1</sup> или наземно-космический интерферометр «Миллиметрон»<sup>2</sup>, основной задачей которых является исследование и получение изображения окрестностей черной дыры.

**Целью** данной работы является исследование структуры межзвездной среды и оценка параметров рассеяния с помощью методов наземно-космического РСДБ миссии «Радиоастрон» в направлении на пульсар B0531+21, который расположен в Крабовидной туманности, а также изучение свойств индивидуальных гигантских импульсов данного пульсара.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать модуль для программного коррелятора Астрокосмического Центра ФИАН, который позволяет выполнять потоковую обработку данных РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсаров.
2. Используя данные наблюдений наземно-космического интерферометра «Радиоастрон», для каждой эпохи наблюдений оценить параметры рассеяния: время рассеяния  $\tau_{SC}$ , полосу декорреляции  $\nu_d$ , угловой размер диска рассеяния  $\theta_H$ , радиус дифракционного пятна  $r_{diff}$ , а также проанализировать эволюцию этих параметров во времени.
3. Исследовать структуру и свойства межзвездной среды в направлении на пульсар в Крабовидной туманности, применяя модель оди-

---

<sup>1</sup><http://www.eventhorizontelescope.org/>

<sup>2</sup><http://millimetron.ru/index.php/ru/>

ночного тонкого рассеивающего экрана. Определить расстояние  $d$  до этого экрана для каждой эпохи радиоинтерферометрических наблюдений. Проанализировать эволюцию расстояния  $d$  до эффективного рассеивающего экрана во времени.

4. Исследовать свойства индивидуальных гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности, наличие и свойства тонкой структуры гигантских импульсов на длине волны 18 см, получить распределение гигантских импульсов по энергиям и проанализировать эволюцию во времени показателя степени  $\gamma$  энергетического спектра гигантских импульсов.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые были проведены наземно-космические РСДБ наблюдения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности с помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон». Максимальная проекция базы в наблюдениях при этом составила 153 000 км на длине волны 18 см и 57 000 км на длине волны 92 см.
2. Впервые с помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» обнаружена субструктура диска рассеяния, выполнены прямые измерения времени рассеяния  $\tau_{SC}$ .
3. Впервые для длины волны 18 см обнаружена временная субструктура в гигантских импульсах пульсара в Крабовидной туманности с характерным масштабом  $t \leq 30$  нс и яркостной температурой  $T_b \geq 10^{38}$  К.

#### **Практическая значимость.**

Результаты данной работы могут быть использованы для детального исследования турбулентных процессов в межзвездной среде и для дальнейшего развития теории рассеяния радиоволн в межзвездной плазме. Результаты исследования свойств индивидуальных гигантских импульсов могут быть учитываться при построении моделей механизма генерации этих импульсов.

#### **Методология и методы исследования.**

Результаты данной работы были получены на основе наблюдений, выполненных с помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон». Для первичной обработки (корреляции) данных использовался программный коррелятор Астрокосмического Центра ФИАН. Данный программ-

ный коррелятор является основным для первичной обработки данных в проекте «Радиоастрон» и зарекомендовал себя как современный, универсальный и надежный инструмент обработки радиоинтерферометрических данных.

При последующем анализе и интерпретации наблюдательных данных использовались разнообразные методы обработки данных, линейная и нелинейная аппроксимация экспериментальных данных, статистический анализ автокорреляционных и структурных функций.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые для пульсара в Крабовидной туманности с помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» на длине волны 18 см обнаружена субструктура в диске рассеяния радиоизлучения этого пульсара. Наличие субструктуры в диске рассеяния подтверждается характерной формой функции видности для наземно-космических баз и поведением амплитуды функции видности в зависимости от проекции базы. Функции видности для наземных баз имеет доминирующую узкую компактную деталь (её временной масштаб  $\sim 60$  нс). Для наземно-космических баз функция видности состоит из группы деталей, накладывающихся друг на друга и распределенных в некотором интервале запаздываний, который отождествляется с временем рассеяния интерферирующих лучей  $\tau_{SC}$  (временной масштаб  $\sim 1 - 5$  мкс). С увеличением проекции базы амплитуда функции видности падает. Однако на протяженных наземно-космических базах ( $B > 40000$  км) она становится практически постоянной, имеет значимую и отличную от нуля величину  $\approx 0.45$ .
2. Измерены параметры рассеяния гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности для восьми эпох наблюдений на длинах волн 18 см и 92 см. Измерены: время рассеяния  $\tau_{SC}$ , полоса декорреляции  $\Delta\nu_d$ , угловой размер диска рассеяния  $\theta_H$ , время мерцаний  $t_{scint}$ , а также размер дифракционного пятна  $r_{diff}$ . С помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» прямым методом измерено время рассеяния  $\tau_{SC}$ . Для разных эпох измеренные параметры рассеяния на длине волны 18 см находятся в пределах:  $\tau_{SC} : 0.9 \pm 0.1 - 5.8 \pm 0.3$  мкс,  $\Delta\nu_d : 40.7 \pm 4.6 \div 161.1 \pm 13.4$  кГц,

$\theta_H : 0.4 \pm 0.1 \div 1.3 \pm 0.2$  миллисекунд дуги,  $r_{diff} : 10361 \pm 1700 \div 34015 \pm 9268$  км,  $t_{scint} : 7.5 \pm 2.1 \div 123.3 \pm 20.2$  сек. Для длины волны 92 см:  $\tau_{SC} = 2.34 \pm 0.02$  мс,  $\Delta\nu_d = 68 \pm 2$  Гц,  $\theta_H = 14.0 \pm 1.4$  миллисекунд дуги,  $r_{diff} = 5140 \pm 500$  км,  $t_{scint} = 2.9 \pm 0.3$  сек.

3. Для каждой эпохи наблюдений, на основе измеренных параметров рассеяния, определены расстояния до эффективного рассеивающего экрана. В результате показано, что расстояние до экрана в зависимости от эпохи наблюдений менялось. В период сильного рассеяния расстояние было близким к Крабовидной туманности. Следовательно, Крабовидная туманность часто имеет доминирующее влияние на наблюдаемые эффекты рассеяния. Из восьми эпох наблюдений пульсара В0531+21, в четырех из них положение рассеивающего экрана было ближе к Крабовидной туманности. В этих сеансах вычисленные значения параметра  $\alpha_s$ , который определяет положение экрана, составляли  $\alpha_s \geq 0.9$ , что соответствует расстоянию до рассеивающего экрана от центра Крабовидной туманности  $\leq 200$  пк. В случае первого сеанса (RAFS01, 14.11.2011) расстояние до экрана соответствует равномерному распределению рассеивающего вещества на луче зрения  $d = L/3$ . Изменяющееся положение рассеивающего экрана указывает на наличие, как минимум, двух областей рассеяния: области близкой к Крабовидной туманности и протяженной рассеивающей области, обусловленной межзвездной плазмой.
4. Обнаружены вариации спектрального индекса  $\gamma$  степенного распределения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности по энергиям в зависимости от эпохи. Величина показателя степени  $\gamma$  распределения импульсов по энергиям в зависимости от эпохи наблюдений составила:  $-2.48 \pm 0.01$  (02.03.2012),  $-2.06 \pm 0.01$  (06.03.2012),  $-1.64 \pm 0.01$  (23.10.2012),  $-1.60 \pm 0.01$  (27.10.2013),  $-1.63 \pm 0.01$  (02.11.2013),  $-1.63 \pm 0.01$  (10.01.2015),  $-2.51 \pm 0.01$  (28.01.2015).
5. Впервые на частоте 1668 МГц в индивидуальных гигантских импульсах пульсара в Крабовидной туманности обнаружена временная субструктура, которая содержит неразрешенные всплески длительностью меньше 30 нс. Было выполнено моделирование распро-

странения гигантских импульсов с заданной структурой через рассеивающую среду с экспериментально измеренным значением полосы декорреляции  $\Delta\nu_d \approx 300$  кГц. Результаты моделирования сравнивались с представленными в работе результатами РСДБ наблюдений на частоте 1668 МГц. Сравнительный анализ позволил выявить наличие в гигантских импульсах тонкой структуры. Обнаруженная тонкая структура состоит из неразрешенных пиков длительностью  $\tau \leq 30$  нс и яркостной температурой  $T_b \geq 10^{38}$  К. Подобные компоненты ранее наблюдались только на частотах выше 4 – 5 ГГц – в той области частот, где они не замываются рассеянием.

6. Анализ структурных функций фазы функции видности показал, что величина фазовых флуктуаций на малых временах  $\Delta t \leq 20$  сек. определяется мерцаниями. Средняя величина фазовых флуктуаций на основе измерений по восьми эпохам наблюдений составила  $\langle \Delta\varphi \rangle = 0.42$  рад. Измерения этой величины проводились на наземных базах вплоть до 9000 км. Показано, что величина  $\Delta\varphi$  не зависит от проекции базы  $B$  в случае, когда проекция базы меньше характерного масштаба дифракционной картины  $B < r_{diff}$ .

**Достоверность** и обоснованность полученных результатов и выводов, представленных в настоящей работе, подтверждается надежностью методик, реализованных в программном обеспечении, которое использовалось при обработке данных; техническим состоянием инструментов, на которых проводились радиоинтерферометрические наблюдения. Время рассеяния и полоса декорреляции в данной работе были измерены двумя независимыми способами. Результаты этих измерений согласуются между собой. Представленные в этой работе результаты, где это было применимо, сравнивались с результатами ранее опубликованными другими авторами. Достоверность представленных результатов также подтверждается апробацией на российских и зарубежных международных конференциях и семинарах, где присутствовали специалисты рассматриваемой области.

**Апробация работы.** Все результаты и положения, которые выносятся на защиту, апробированы в публикациях и обсуждениях на конференциях. Результаты были представлены и обсуждались на следующих конференциях:

1. COSPAR-2014, г. Москва, 2014.



2. 12th EVN Symposium and Users Meeting, г. Кальяри, Италия, 2014.
3. XII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», г. Москва, 2015.
4. Dissecting the Universe – Workshop on Results from High-Resolution VLBI, г. Бонн, Германия, 2015.
5. International Conference All-wave Astronomy. Shklovsky-100, г. Москва, 2016.
6. Scintillometry Workshop, г. Бонн, Германия, 2016.
7. Ежегодные научные отчетные сессии Астрокосмического Центра ФИАН (2014, 2015).
8. Семинары Астрокосмического Центра ФИАН.

**Публикации.** Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах и тезисах российских и зарубежных международных конференций. Всего опубликовано 6 научных работ [А1-А4;Б1;Б2], включая тезисы докладов на научных конференциях [Б1;Б2]. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, суммированы в 4 статьях [А1-А4], которые изданы в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК (Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки РФ).

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

**А1.** Рудницкий А. Г., Попов М. В., Согласнов В. А. Исследование космической плазмы по данным РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсара В0531+21 в проекте «Радиоастрон» // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 2. — С. 167–176.

**А2.** Кардашев Н. С., Алакоз А. В., Андрианов А. С., Артюхов М. И., Баан В., Бабышкин В. Е., Бартель Н., Баяндина О. С., Вальтц И. Е., Войцук П. А., Воробьев А. З., Гвинн К., Гомез Х. Л., Джуованнини Г., Джонси Д., Джонсон М., Имаи Х., Ковалев Ю. Ю., Куртц С. Е., Лисаков М. М., Лобанов А. П., Молодцов В. А., Новиков Б. С., Погодин А. В., Попов М. В., Привезенцев А. С., Рудницкий А. Г., Рудницкий Г. М., Саволайнен Т., Смирнова Т. В., Соболев А. М., Согласнов В. А., Соколовский К. В., Филиппова Е. Н., Чурикова М. Е., Ширшаков А. Е., Шишов В. И., Эдвардс Ф. «РАДИОАСТРОН»: Итоги выполнения научной программы исследований за 5

лет полёта // *Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина»*. — 2016. — Т. 33, № 3. — С. 4–24.

**А3.** *Попов М. В., Рудницкий А. Г., Согласнов В. А.* Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности – индикаторы сильной электромагнитной волны // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 3. — С. 194–203.

**А4.** *Попов М. В., Рудницкий А. Г., Согласнов В. А.* Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 5. — С. 387–399.

Тезисы докладов научных конференций:

**Б1.** *Rudnitskiy A. G., Popov M. V., Soglasnov V. A.* Preliminary results of giant pulse investigations from Crab pulsar with Radioastron // Труды конференции 12th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science, 065. — 2015.

**Б2.** *Рудницкий А. Г.* Исследование эффектов рассеяния в космической плазме гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности // Труды 12-ой Конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» 13–15 апреля 2015, ИКИ РАН, Москва: Сборник трудов / Под редакцией А.М. Садовского. Серия «Механика, управление и информатика», с. 134-141. — 2015.

**Личный вклад.** Автор диссертационной работы совместно с научным руководителем и соавторами участвовал в постановке задач исследований, а также в анализе, интерпретации и обсуждении результатов, формулировке выводов работы. Во всех основных результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным и определяющим. Автор лично или при участии коллег провел следующие работы:

1. Для выполнения представленных исследований автором были составлены заявки на выделение наблюдательного времени в проекте «Радиоастрон» (цикл заявок Announcement of Opportunity-2, 2015 год), а также на наземных радиотелескопах. Эти заявки были одобрены международным программным комитетом на конкурсной основе.
2. В рамках выполнения диссертационной работы, автор самостоятельно разработал модуль поиска и корреляции гигантских импульсов

пульсаров для программного коррелятора Астрокосмического Центра ФИАН.

3. Автором лично была выполнена вся корреляционная и посткорреляционная обработка данных наземно-космических РСДБ наблюдений, включая амплитудную калибровку. Диссертант самостоятельно на основе этих данных выполнил оценки всех параметров рассеяния, оценил расстояния до рассеивающего экрана. Процедура обработки, результаты были опубликованы в работах [А1;А2;А4]. Интерпретация, оформление содержания и написание текста работ [А1;А4], а также написание части, связанной с результатами данной диссертационной работы, для публикации [А2] были выполнены и подготовлены автором самостоятельно.
4. Диссертант самостоятельно выполнил построение и анализ структурных функций фазы функций видности гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности. Результаты анализа представлены в работе [А4].
5. Автором были получены распределения гигантских импульсов по энергиям, выполнены оценки показателя степени  $\gamma$  этого распределения, проведен анализ изменения этого параметра во времени. Результаты также представлены в работе [А4].
6. Исследовано влияние структуры индивидуальных гигантских импульсов и эффектов рассеяния на полосу декорреляции и функцию видности. Для этого выполнялось моделирование рассеяния индивидуальных гигантских импульсов. Результаты были опубликованы в работе [А3]. Диссертант принимал равное участие с соавторами в получении результатов, их обсуждении и интерпретации, в том числе в подготовке публикации [А3].
7. Все результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на российских и зарубежных международных конференциях автором лично. Презентации докладов и тезисы [Б1;Б2] были подготовлены автором самостоятельно с учетом замечаний, предложений и пожеланий научного руководителя и соавторов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Полный объем диссертации **110** страниц, включая

21 рисунок и 7 таблиц. Список литературы на 10 страницах содержит 103 наименования.

## Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, постановка задач работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена краткому литературному обзору истории открытия и исследования пульсаров и в частности пульсара В0531+21. Данный объект расположен в центре Крабовидной туманности – в остатке сверхновой SN 1054, которая вспыхнула в июле 1054 года [18]. Туманность располагается в созвездии Тельца на расстоянии 2 кпк от Солнца [19].

Отличительной особенностью пульсара В0531+21 является феномен гигантских импульсов. Пульсары характеризуются периодическим импульсным радиоизлучением. Однако для некоторых из них наблюдается спонтанное появления импульсов во времени с существенным увеличением их плотности потока. Подобное явление принято называть гигантскими импульсами. Для обычных импульсов характерные флуктуации плотности потока превышают среднее значение не более, чем в 10 раз, в то время как плотность потока гигантских импульсов в сотни и тысячи раз больше характерной плотности потока обычных импульсов. Плотность потока индивидуальных гигантских импульсов может достигать значений  $10^5 - 10^6$  Ян [20].

Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности детектируются на вращательных фазах главного импульса и интеримпульса. Интегральное распределение этих импульсов по энергиям подчиняется степенному закону с показателем степени  $\gamma \approx -1.7 \div -3.2$ . Средний профиль В0531+21 в дециметровом диапазоне полностью состоит из гигантских импульсов [21]. Импульсы имеют сильную линейную и круговую поляризацию, являются широкополосными с характерной шириной порядка нескольких сотен МГц [22], а их наблюдаемые флуктуации амплитуды могут быть связаны с изменениями когерентности радиоизлучения [23]. Исследования гигантских импульсов пульсара В0531+21 Хэнкинсом на более высоких частотах ( $> 4$  ГГц), где

эффекты рассеяния не вносят свой вклад, показали, что данные импульсы состоят из суперпозиции множества изолированных пиков (форма дельта-функций) с временными масштабами порядка наносекунд [24]. Структура и количество наносекундных пиков разная для левой и правой круговых поляризованных. Положительные детектирования гигантских импульсов были зафиксированы на частотах вплоть до 43 ГГц [25; 26].

На высоких частотах было показано, что интеримпульс имеет совершенно иные спектральные и временные характеристики по сравнению с главным импульсом [27]. Для каждой компоненты условия генерации и распространения излучения могут быть разными. До сих пор не существует модели, которая полностью бы описывала механизм генерации гигантских импульсов в пульсаре B0531+21. Есть предположение, что импульсы могут возникать в областях полярных шапок близко к поверхности пульсара [28].

Во **второй главе** приведено описание наблюдаемых эффектов рассеяния, методика исследования структуры межзвездной среды и определения параметров рассеяния с использованием модели одиночного тонкого рассеивающего экрана.

В межзвездной среде содержатся свободные электроны, которые приводят к рассеянию когерентного радиоизлучения пульсаров. Наличие неоднородностей распределения электронов вызывает многолучевую интерференцию радиоизлучения, которая формирует в плоскости наблюдателя дифракционную картину с характерным частотным  $\Delta\nu_d = 1/(2\pi \cdot \tau_{SC})$  и пространственным  $r_{diff} = \sqrt{2 \ln 2} \cdot \lambda / (\pi \cdot \theta_H)$  масштабами. Наблюдаются следующие эффекты, вызванные рассеянием: мерцания, которые обладают временным масштабом  $t_{scint}$ , увеличение длительности регистрируемого импульса пульсара, которая характеризуется временем рассеяния  $\tau_{SC}$ , увеличение угловых размеров источника  $\theta_H$ . Данные параметры можно измерить с помощью РСДБ методов с хорошей точностью. Наблюдение этих эффектов позволяют изучать структуру межзвездной среды на масштабах от 1000 км до 10 а. е.

Исследования показали, что в большинстве случаев при изучении структуры межзвездной среды подходит модель тонкого рассеивающего экрана [6; 7], которая указывает на существующие выделенные неоднородности на луче зрения наблюдатель-пульсар.

В данной модели предполагается, что неоднородная межзвездная среда сосредоточена в бесконечно тонком слое с характерным спектром неоднородностей. Учитываются только фазовые вариации, возникающие при прохождении радиоизлучения через этот слой. Для одиночного тонкого рассеивающего экрана, расположенного на расстоянии  $d$  от наблюдателя угловой размер рассеянного диска  $\theta_H$  определяется как [29]:

$$\theta_H = \sqrt{8 \ln 2 \cdot c \cdot \tau_{SC} \cdot \frac{(L - d)}{L \cdot d}}, \quad (1)$$

а время рассеяния  $\tau_{SC}$ :

$$\tau_{SC} = \frac{\theta_H^2}{8c \cdot \ln 2} \cdot \frac{L \cdot d}{(L - d)}, \quad (2)$$

Зная время рассеяния и угловой размер диска рассеяния однозначно определяется расстояние до эффективного рассеивающего экрана:

$$\alpha_s = \frac{8c \cdot \tau_{SC} \cdot \ln 2}{\theta_H^2 \cdot L + 8c \cdot \tau_{SC} \cdot \ln 2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_s = d/L$  (где  $d$  – расстояние от наблюдателя до рассеивающего экрана, а  $L$  – расстояние от наблюдателя до пульсара).

Размер дифракционной картины  $r_{diff}$  неоднородностей межзвездной среды при этом будет выражаться соотношением:  $r_{diff} = \sqrt{2 \ln 2} \cdot \lambda / (\pi \cdot \theta_H)$ , где  $\lambda$  – длина волны, на которой проводились наблюдения [13]. Зная величину  $r_{diff}$  и скорость движения дифракционной картины  $v$ , время мерцаний пульсара  $t_{scint} \approx r_{diff}/v$ .

Время рассеяния  $\tau_{SC}$  и угловые размеры рассеянного диска  $\theta_H$  измеряются с помощью РСДБ наблюдений. Время рассеяния измеряется прямым методом с помощью экспоненциальной аппроксимации средней функции видности наземно-космической баз, а угловой размер кружка вычисляется на основе анализа зависимости амплитуды функции видности от проекции базы [12].

**Третья глава** освещает основные параметры миссии «Радио-астрон» и наземно-космические РСДБ наблюдения гигантских импульсов

пульсара в Крабовидной туманности, которые проводились в рамках исследований, представленных в данной работе.

Миссия «Радиоастрон» начала функционировать в июле 2011 года после запуска космического радиотелескопа «Спектр-Р». Орбита космического радиотелескопа эллиптическая, возмущенная Луной. Перигей меняется от 7065 км до 81500 км, апогей меняется достигает 353000 км. Период орбиты составляет порядка 9 дней.

Бортовой комплекс научной аппаратуры обеспечивают прием сигналов в четырех диапазонах длин волн: Р-диапазон (центральная частота 324 МГц, длина волны 92 см), L-диапазон с центральной частотой 1664 МГц (длина волны 18 см), С-диапазон (центральная частота 4832 МГц, длина волны 6 см), К-диапазон (центральная частота 22232 МГц, длина волны 1.3 см). Прием сигнала может осуществляться в двух субполосах шириной 16 МГц каждая, в левой (ЛКП) и правой (ПКП) круговых поляризациях.

Данный инструмент позволил впервые провести наблюдения пульсара в Крабовидной туманности, исследовать структуру межзвездной среды и эффекты рассеяния радиоизлучения данного пульсара с ранее недостижимым угловым разрешением:  $\sim 0.24$  миллисекунд дуги (длина волны 18 см) и  $\sim 3.2$  миллисекунд дуги (длина волны 92 см).

Было выполнено девять сеансов наблюдений гигантских импульсов пульсара В0531+21. Из этих сеансов: восемь успешных, семь сеансов наблюдались на длине волны 18 см, один сеанс на длине волны 92 см. Интерференционные лепестки с космическим радиотелескопом обнаружены в шести сеансах из восьми. Максимальная проекция базы для сеансов на длине волны 18 см составила 153000 км и 57000 км для длины волны 92 см. Подобные наблюдения проводились впервые.

Первичная обработка (корреляция) наблюдений пульсара в Крабовидной туманности производилась на программном «FX» корреляторе АКЦ ФИАН. Для решения поставленных задач, был разработан модуль поиска и корреляции гигантских импульсов для программного коррелятора Астрокосмического Центра ФИАН с применением метода некогерентной компенсации дисперсии [А1]. Данный модуль позволил выполнить потоковую первичную обработку (корреляцию) всех проведенных сеансов наблюдений пульсара в

Крабовидной туманности. В результате было протектировано около 6500 гигантских импульсов.

Отличительной особенностью проекта является хранение исходных данных радиотелескопов для всех проводившихся наблюдений в центре обработки научной информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН. Подобный подход позволяет при необходимости выполнять переобработку данных любого сеанса.

Так как коррелированная амплитуда для гигантских импульсов зависит от их интенсивности, то для дальнейшего анализа данных дополнительно применялась амплитудная нормировка.

В четвертой главе приводятся результаты исследования индивидуальных свойств гигантских импульсов пульсара B0531+21. Представленные в данной главе результаты опубликованы в работах [A3;A4].

Для исследования индивидуальных свойств гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности анализировался сеанс RAGS10A, проводившийся 10.01.2015. Первичная обработка выполнялась с применением метода когерентной компенсации дисперсии для получения наилучшего возможного временного разрешения (0.03125 мкс).

Затем, было выполнено моделирование распространения гигантских импульсов с заданной структурой через рассеивающую среду с экспериментально измеренным значением полосы декорреляции  $\Delta\nu \approx 320$  кГц. Структура гигантских импульсов моделировалась случайным набором неразрешенных во времени всплесков, равномерно распределенных в интервале 2-х микросекунд с амплитудами, распределенными по Гауссу. Каждый всплеск представлялся в виде двух отсчетов с одинаковыми амплитудами и разными знаками. К этой структуре добавлялся некоторый уровень случайного шума с нормальным распределением, так что отношение сигнала к шуму составляло величину около 100.

После этого, формировалась АЧХ приемника  $F(\nu)$  в полосе  $B_\nu = 16$  МГц с плоским участком в диапазоне от  $\nu_b$  до  $B_\nu - \nu_b$  и с краями, спадающими по степенному закону  $F(\nu) \propto F(\nu - \nu_b)^{-k}$  с показателем  $k = 4$ . Плоский участок занимал 0.75 всей полосы, то есть 12 МГц. Данная АЧХ накладывалась на спектр мерцаний, заданный в виде суммы двусторонних экспоненциальных функций  $Y_i(\omega) = A_i e^{-b(\omega - \omega_i)}$ , частотные центры которых  $\omega_i$  были случайно-равномерно распределены по всей полосе приема, а амплитуды рас-



пределены по Гауссу. Показатель экспоненты  $b$  был выбран в соответствии с реально измеренным средним значением полосы декорреляции (около 300 кГц). Число мерцательных пиков в спектре было принято равным 10.

Для каждого случая по сформированной АЧХ вычислялась ФЧХ. Результат прохождения смоделированного гигантского импульса через данную реализацию рассеивающей среды получался путем умножения спектра этого импульса на передаточную функцию. На выходе получался комплексный спектр сгенерированного сигнала гигантского импульса, прошедшего через данную реализацию рассеивающей среды.

Результаты моделирования сравнивались с полученными в работе результатами РСДБ наблюдений на частоте 1668 МГц. Сравнение формы полосы декорреляции показывает наличие узкой центральной компоненты (частотный масштаб  $\sim 50$  кГц), которая обусловлена влиянием спектра индивидуальных импульсов, и широкой компоненты (частотный масштаб  $\sim 320$  кГц), которая соответствует спектру мерцаний. При определении значения полосы декорреляции следует использовать именно широкую компоненту. Аналогичные результаты получаются для функции видности, где присутствуют две компоненты: узкая компонента (временной масштаб  $\sim 0.1$  мкс), которая обусловлена тонкой структурой гигантских импульсов и широкая компонента (временной масштаб  $\sim 1.5$  мкс), обусловленная рассеянием. Величину времени рассеяния  $\tau_{SC}$  следует измерять по широкой компоненте в функции видности.

Сравнительный анализ формы реальных и смоделированных функций видности позволил выявить наличие в гигантских импульсах тонкой структуры. Подтверждается заданная модель гигантских импульсов, в которой доминируют неразрешенные компоненты, а наблюдаемые структуры являются результатом интерференции между отдельными идентичными волновыми пакетами. Временной масштаб таких неразрешенных компонент  $\leq 30$  нс, а яркостная температура  $T_b \geq 10^{38}$  К. Подобные компоненты ранее наблюдались только на частотах выше 5 ГГц – в той области частот, где они не замываются рассеянием.

Для каждой эпохи наблюдений исследовалось распределение гигантских импульсов по энергиям. Для этого анализировались кумулятивные распределения (CPD) гигантских импульсов по энергиям для главного импуль-

са. Были получены значения показателя  $\gamma$  степенного распределения количества гигантских импульсов по энергиям. Полученные значения показателя  $\gamma$  лежат в пределе  $-1.6 \div -2.5$ , что не противоречит ранее полученным значениям. Наблюдаются вариации значения показателя  $\gamma$  в зависимости от эпохи наблюдений.

Был выполнен анализ структурных функций фазы функции видности во времени для индивидуальных гигантских импульсов на наземных базах. Значение фазовых флуктуаций  $\Delta\varphi$  для пульсара в Крабовидной туманности отражает влияние дифракционных искажений радиоспектра индивидуальных импульсов, обусловленных мерцаниями, а также тонкую структуру самих гигантских импульсов. Среднее значение флуктуации фазы для пульсара В0531+21 составило  $\langle \Delta\varphi \rangle \approx 0.42$  рад. По сравнению с внегалактическими источниками непрерывного спектра 0642+449 ( $\Delta\varphi \approx 0.036$  рад.) и 1228+126 ( $\Delta\varphi \approx 0.08$  рад.), величина фазовых флуктуаций пульсаров оказалась существенно больше.

Исследование поведения фазы во времени с помощью структурных функций позволяет сделать дополнительные оценки углового размера кружка рассеяния, используя соотношение  $\theta_H = c \cdot \tau_g / B$ , где  $\tau_g = \Delta\varphi / (2 \cdot \pi \cdot \nu)$  – геометрическая задержка. Однако, результаты показали, что фазовые флуктуации  $\Delta\varphi$  не меняются с увеличением проекции базы  $B$  до 9000 км. Для сравнения была получена зависимость величины  $\Delta\varphi$  от  $B$  для пульсара В0329+54 на длине волны 92 см. Изменение фазовых флуктуаций  $\Delta\varphi$  для этого пульсара наблюдалось при проекциях базы, превышающих радиус дифракционного пятна  $r_{diff}$ , который составляет  $\sim 17000$  км на длине волны 92 см. Полученное в данной работе значение радиуса дифракционного пятна  $r_{diff}$  для пульсара В0531+21 на длине волны 18 см для разных эпох находится в пределах  $10361 \pm 1700 \div 34015 \pm 9268$  км, что превышает максимальную проекцию наземных баз. Величина  $\Delta\varphi$  для пульсара В0531+21 не зависит от проекции базы  $B$ , когда  $B < r_{diff}$ . В этом случае невозможно измерить угловой размер диска рассеяния  $\theta_H$ , используя соотношение  $\theta_H = c \cdot \tau_g / B$ . Помимо этого, выявляются квазирегулярные флуктуации фазы в структурной функции с характерным временным масштабом  $\sim 1000 - 1200$  секунд, которые объясняются атмосферными и ионосферными возмущениями.

В пятой главе приводятся результаты исследования структуры межзвездной среды и оценки параметров рассеяния на основе анализа функций видности, полученных в наземно-космических РСДБ наблюдениях гигантских импульсов пульсара B0531+21. Оценки выполнялись в приближении модели одиночного тонкого рассеивающего экрана. Представленные в данной главе результаты опубликованы в работах [A1;A2;A4], а также в тезисах докладов [B1;B2].

Для восьми эпох наземно-космических РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 были измерены следующие параметры рассеяния: время рассеяния  $\tau_{SC}$ , полоса декорреляции  $\Delta\nu_d$ , угловой размер диска рассеяния  $\theta_H$ , время мерцаний  $t_{scint}$ , а также размер дифракционного пятна  $r_{diff}$ .

Полоса декорреляции  $\nu_d$  и время рассеяния  $\tau_{SC}$  измерялись двумя независимыми способами. Результаты этих измерений находятся в хорошем согласии между собой. В процессе анализа функций видности для наземных баз, практически во всех сеансах на длине волны 18 см, было выявлено три временных масштаба: масштаб, соответствующий узкой центральной неразрешенной компоненте ( $\sim 60$  нс), промежуточный масштаб ( $\sim 90 - 100$  нс) и протяженный масштаб, соответствующий рассеянию ( $\sim 1 - 5$  мкс). Полученные параметры рассеяния находятся в хорошем согласии с ранее опубликованными результатами.

Для каждой эпохи наблюдений, на основе измеренных параметров рассеяния были определены расстояния до эффективного рассеивающего экрана. Результаты показали, что расстояние до экрана в зависимости от эпохи менялось. В период сильного рассеяния расстояние было близко к Крабовидной туманности. Из этого следует, что Крабовидная туманность часто имеет доминирующее влияние на наблюдаемые эффекты рассеяния. Изменяющееся положение рассеивающего экрана указывает на наличие как минимум двухкомпонентного рассеяния — области, близкой к Крабовидной туманности и протяженной рассеивающей области, обусловленной межзвездной плазмой.

На длине волны 18 см была обнаружена субструктура в диске рассеяния радиоизлучения пульсара в Крабовидной туманности. Наличие этой субструктуры подтверждается разницей в форме функции видности для наземно-космических и наземных баз, а также поведением амплитуды функции

видности в зависимости от проекции базы. Зависимость амплитуды функции видности от проекции базы при  $B > 40000$  км становится постоянной со средней величиной  $\approx 0.45$ .

По результатам измерений параметров рассеяния, подтверждается степенная зависимость  $\theta_H \propto \nu^\alpha$  с показателем степени  $\alpha = -1.66$  для зависимости углового размера диска рассеяния от частоты, и  $\tau_{SC} \propto \nu^\alpha$ , где  $\alpha = -3.58$  для зависимости времени рассеяния от частоты. Для гауссовой формы спектра неоднородностей величина показателя  $\alpha$  для  $\theta_H(\nu)$  составляет  $-2.0$  и для  $\tau_{SC}(\nu)$   $-4.0$ . Отклонение показателей степени от ожидаемых значений указывает на наличие анизотропии рассеивающего вещества на луче зрения наблюдатель-пульсар.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые выносятся на защиту диссертации.

## Список литературы

1. *Scheuer P. A. G.* Amplitude Variations in Pulsed Radio Sources // *Nature*. — 1968. — Vol. 268. — Pp. 920–922.
2. *Rickett B. J.* Interstellar scattering and scintillation of radio waves // *Annual review of astronomy and astrophysics*. — 1977. — Vol. 15. — Pp. 479–504.
3. *Armstrong J. W., Rickett B. J., Spangler S. R.* Electron density power spectrum in the local interstellar medium // *Astrophysical Journal, Part 1*. — 1995. — 4. — Vol. 443, no. 1. — Pp. 209–221.
4. *Rickett B. J.* Radio propagation through the turbulent interstellar plasma // *Annual review of astronomy and astrophysics*. — 1990. — Vol. 28. — Pp. 561–605.
5. *Narayan R.* The Physics of Pulsar Scintillation // *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*. — 1992. — 10. — Vol. 341, no. 1660. — Pp. 151–165.
6. *Putney M. L., Stinebring D. R.* Multiple Scintillation Arcs In Six Pulsars // *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 2006. — 12. — Vol. 6, no. S2. — Pp. 233–236.

7. *Rickett B. J., Johnston S., Tomlinson T., Reynolds J.* The inner scale of the plasma turbulence towards PSR J1644-4559 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — 5. — Vol. 395, no. 3. — Pp. 1391–1402.
8. *Fiedler R. L., Dennison B., Johnston K. J., Hewish A.* Extreme scattering events caused by compact structures in the interstellar medium // *Nature*. — 1987. — 4. — Vol. 326. — Pp. 675–678.
9. *Lazio T., Joseph W., Waltman E. B. et al.* A Dual-Frequency, Multiyear Monitoring Program of Compact Radio Sources // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2001. — 10. — Vol. 136, no. 2. — Pp. 265–392.
10. *Senkbeil C. E., Ellingsen S. P., Lovell J. E. J. et al.* A Compact Extreme Scattering Event Cloud toward AO 0235+164 // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2008. — 1. — Vol. 672, no. 2. — P. L95.
11. *Desai K. M., Fey A. L.* Anisotropic Interstellar Scattering toward the Cygnus Region // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2001. — 4. — Vol. 133, no. 2. — Pp. 395–411.
12. *Gwinn C. R., Bartel N., Cordes J. M.* Angular broadening of pulsars and distribution of interstellar plasma fluctuations // *Astrophysical Journal*. — 1993. — 6. — Vol. 410, no. 2. — P. 673.
13. *Popov M. V., Andrianov A. S., Bartel N. et al.* PSR B0329+54: Statistics of Substructure Discovered within the Scattering Disk on RadioAstron Baselines of up to 235,000 km // *Astrophysical Journal*. — 2016. — Vol. 822, no. 2. — P. 13.
14. *Попов М. В., Андрианов А. С., Бартель Н. и др.* Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении трех удаленных пульсаров по результатам наблюдений с наземно-космическим интерферометром «Радиоастрон» // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 9. — С. 778–794.
15. *Smirnova T. V., Shishov V. I., Popov M. V. et al.* RadioAstron Studies of the Nearby, Turbulent Interstellar Plasma with the Longest Space-Ground

- Interferometer Baseline // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 786. — P. 115.
16. *Shishov V. I., Smirnova T. V., Gwinn C. R. et al.* Interstellar scintillations of PSR B1919+21: space-ground interferometry // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, *submitted*. — 2016.
  17. *Gwinn C. R., Kovalev Y. Y., Johnson M. D., Soglasnov V. A.* Discovery of Substructure in the Scatter-broadened Image of Sgr A\* // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2014. — 10. — Vol. 794, no. 1. — P. L14.
  18. *Breen A., McCarthy D.* A Re-evaluation of the Eastern and Western Records of the Supernova of 1054 // *Vistas in Astronomy*. — 1995. — Vol. 39, no. 3. — Pp. 363–379.
  19. *Trimble V.* The Distance to the Crab Nebula and NP 0532 // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1973. — Vol. 85, no. 507. — P. 579.
  20. *Soglasnov V. A.* Amazing properties of giant pulses and the nature of pulsar's radio emission // *MPE Report*. — 2007. — P. 68.
  21. *Popov M. V., Soglasnov V. A., Kondrat'ev V. I. et al.* Giant pulses – the main component of the radio emission of the Crab pulsar // *Astronomy Reports*. — 2006. — Vol. 50. — Pp. 55–61.
  22. *Sallmen S., Backer D. C., Hankins T. H. et al.* Simultaneous Dual-Frequency Observations of Giant Pulses from the Crab Pulsar // *Astrophysical Journal*. — 1999. — Vol. 517, no. 1. — Pp. 460–471.
  23. *Lundgren S. C., Cordes J. M., Ulmer M. et al.* Giant Pulses from the Crab Pulsar: A Joint Radio and Gamma-Ray Study // *Astrophysical Journal*. — 1995. — Vol. 453. — P. 433.
  24. *Hankins T. H., Kern J. S., Weatherall J. C., Eilek J. A.* Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar // *Nature*. — 2003. — Vol. 422. — P. 141.

25. *Hankins T. H., Jones G., Eilek J. A.* The Crab Pulsar at Centimeter Wavelengths. I. Ensemble Characteristics // *Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 802, no. 2. — P. 130.
26. *Eilek J. A., Hankins T. H.* Radio emission physics in the Crab pulsar // *Journal of Plasma Physics*. — 2016. — Vol. 82, no. 3. — P. 34.
27. *Hankins T. H., Eilek J. A.* Radio Emission Signatures in the Crab Pulsar // *Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 670, no. 1. — Pp. 693–701.
28. *Soglasnov V. A., Popov M. V., Bartel N. et al.* Giant pulses from PSR B1937+21 with widths  $\leq 15$  nanoseconds and  $T_b \geq 5 \cdot 10^{39}$  K the highest brightness temperature observed in the Universe // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 616, no. 1. — P. 439.
29. *Britton M. C., Gwinn C. R., Ojeda M. J.* Angular broadening of nearby pulsars // *Astrophysical Journal*. — 1998. — Vol. 501. — P. 101.