

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Астрокосмический центр

На правах рукописи

Торопов Максим Олегович

**Исследование некоторых сильных пульсаров по наблюдениям на
радиотелескопе БСА ФИАН**

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Филиале «Пушинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук	
Научный руководитель:	Тюльбашев Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, Пушинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН, Московская область, Пушино
Официальные оппоненты:	
	Пширков Максим Сергеевич, доктор физико-математических наук, МГУ имени М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, г. Москва
	Зюзин Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва
Защита состоится «24» июня 2026 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.262.02 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.	
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайте ФИАН https://www.lebedev.ru и http://www.asc-lebedev.ru в разделе "Диссертационный совет".	
Автореферат разослан «20» мая 2026 г.	
Ученый секретарь Диссертационного совета Д 24.1.262.02, кандидат физико-математических наук	Н.Н. Шахворостова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Несмотря на прошедшие после открытия радиопульсаров в 1967г. почти 60 лет, остаётся ряд задач, которые так и остались не до конца решёнными. Осталось много проблем в понимании физических процессов, происходящих в магнитосфере нейтронных звёзд. Открытым вопросом остается направление эволюции угла наклона между осью вращения и магнитной осью пульсара. Отражением процессов, идущих в магнитосфере, является средний профиль, представляющий собой своеобразный «отпечаток пальца» конкретного пульсара. Изучение деталей среднего профиля требует высокой чувствительности радиотелескопа в сочетании с длительным периодом наблюдения.

Наличие в спектрах большинства пульсаров наблюдаемых низкочастотных завалов, начинающихся в районе частоты 100 МГц, обуславливает появление максимума в спектрах в метровом диапазоне длин волн. Меридианный телескоп Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) в силу высокой чувствительности позволяет решать много разных задач, требующих в том числе и высокой чувствительности на длительном периоде наблюдений. Накопление данных в режиме работы 24/7 на протяжении более 10 лет позволяет для каждого пульсара, попадающего в покрываемую площадку, получать несколько тысяч наблюдательных сессий. Учитывая, что в метровом диапазоне эффективная площадь радиотелескопа БСА самая высокая в мире, дополнительный рост отношения сигнала к шуму (S/N) приводит к выявлению новых деталей в средних профилях давно известных и хорошо исследованных пульсаров, повышает эффективность исследований межзвёздных мерцаний, позволяет широко использовать статистический анализ для проверки теоретических моделей. Чувствительность радиотелескопа позволяет регистрировать отдельные импульсы, при том в мониторинговых наблюдениях регистрируется около 300 секундных пульсаров [1]. Часть из этих пульсаров, представляющих нерегулярно наблюдаемые импульсные сигналы, обнаружена впервые на БСА ФИАН и принадлежит выборке RRAT.

Цели и задачи диссертации

Выявление новых деталей средних профилей редко встречающихся пульсаров с уникальными свойствами или пульсары с особенностями (вращающиеся радиотранзиенты, пульсары, обладающих индивидуальностями в среднем профиле), изучение вариации интенсивности излучения, статистический анализ большой выборки пульсаров, в том числе и с интеримпульсами, на значительном количестве наблюдаемых сессий.

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

- а) получение методики обработки в приложении к данным БСА3;
- б) исследование отдельных пульсаров (исследование межзвездной среды);
- в) проверка гипотезы об эволюции соосных и ортогональных ротаторов;
- г) поиск новых компонент в средних профилях.

Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов.

На 25% увеличена выборка пульсаров, имеющих интеримпульсы. Проведена статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, подтверждающая квазианалитическую модель, разработанную Бескиным, Гуревичем и Истоминым, – БГИ (BGI), согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными, в отличие от численной магнитогидродинамической моделью магнитосферы – МГД (MHD), по которой магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

Для J0953+0755 впервые измерен частотный масштаб дифракционных межзвездных мерцаний интеримпульсов и показано, что формы спектра для интеримпульса и главного импульса хорошо коррелируют и имеют одинаковый частотный масштаб. Обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, связана с рефракционными мерцаниями. Впервые измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом (мост излучения).

У J0826+2637 обнаружены вариации амплитуд главного импульса и интеримпульса на нескольких временных масштабах, вызванных, соответственно: рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, рефракцией радиоволн в межзвездной среде и наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пк от Земли.

Выявлены новые детали средних профилей: J1543+0929 имеет излучение на протяжении практически всего периода, J2234+2114 имеет предимпульс.

Результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

Методология и методы

Результаты, описанные в настоящей работе, получены с использованием комплекса программ для обработки результатов наблюдений:

- формирование коэффициентов K/Δ и поправок за наклон антенны к меридиану «радиоэталонных» источников;
- автоматизированное формирование изменения потока пульсара;
- определение моментов прихода импульсов от пульсаров.

Использовались известные методы обработки данных, математической статистики (среднее значение, дисперсия, линейная аппроксимация, коэффициент корреляции). Для обработки данных использовались программы, написанные специально для этих целей автором диссертации на языке C++, с использованием следующих, размещённых в сети Интернет инструментов:

- библиотеки SOFA (Standards of Fundamental Astronomy) Международного Астрономического Союза, реализованной на языке C;
- эфемерид EPM2017 и библиотеки для работы с эфемеридами libephaccess, реализованной на языке C, Института прикладной астрономии РАН;
- для Фурье-анализа библиотека FFTW;
- для вейвлет-анализа библиотека NFFT;
- для работы с файлами Excel библиотек SimpleXlsxWriter и Xlnt, реализованные на языке C++.

Достоверность результатов

Результаты, приведенные в настоящей диссертации, опубликованы в научных журналах. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным представлениям о механизме излучения в магнитосфере пульсара и распространением излучения пульсаров в межзвездной среде, а также качественном и количественном согласии с результатами, полученными другими исследователями и на других радиотелескопах.

Практическая значимость работы

Статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами вносит дополнительный вклад в изучение направления эволюции угла наклона между осью вращения и магнитной осью пульсара, что улучшает понимание физических процессов, происходящих в магнитосфере нейтронных звёзд. Детализация среднего профиля позволяет улучшить понимание распределения областей излучения, расположенных неравномерно внутри конуса силовых линий над магнитным полюсом. Изучение рефракционных мерцаний радиоизлучения пульсаров позволяет составить карту распределения облаков ионизированной плазмы в Галактике.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Проведен поиск интерпульсов в выборке из 96 пульсаров, имеющих период $P > 0,25$ с и меру дисперсии $DM < 100$ пк/см³. Интеримпульсы найдены у 12 пульсаров, у 9 из них – впервые. Проведена статистическая проверка гипотез об эволюции магнитной оси пульсаров со временем. Проведенная статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами подтверждает квазианалитическую модель магнитосферы, согласно которой в

ходе эволюции магнитная ось и ось вращения пульсаров становятся ортогональными, в отличие от численной магнитогидродинамической модели магнитосферы, по которой магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

2. Исследование вариации амплитуд главного импульса и интеримпульса радиопульсара J0826+2637 на длительном временном интервале позволили:

- подтвердить отмеченный в предыдущих работах временной масштаб 37 дней, вызванный рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, которая распределена в основном квази-однородно на луче зрения, и вносящий основной вклад в наблюдаемую переменность;
- впервые обнаружить временной масштаб переменности 5 дней, связанный с рефракцией радиоволн в межзвездной среде мерцаниями на структуре, пространственный масштаб которой примерно в 7 раз меньше основного масштаба, и вносящий примерно 1/3 в вариации амплитуды излучения от пульсара;
- впервые обнаружить временной масштаб переменности в один год, связанный с наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пс от Земли.

3. Измерен частотный масштаб дифракционных межзвездных мерцаний интеримпульсов радиопульсара J0953+0755 ($f_{\text{dif}} = 200 - 800$ кГц), и показано, что формы спектра для интеримпульса и главного импульса хорошо коррелируют и имеют одинаковый частотный масштаб. Впервые обнаружен рефракционный масштаб мерцаний 1-2 дня. Обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, также связана с рефракционными мерцаниями. Измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом со средним значением $2,00 \pm 0,28$ % от главного импульса. Впервые измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом (мост излучения) со средним значением $1,04 \pm 0,28$ %.

4. Выявлены ранее не обнаруженные детали средних профилей радиопульсаров J1543+0929 и J2234+2114. Для радиопульсара J1543+0929 выявлено низкоуровневое излучение (межимпульсное излучение) практически на всех долготах внутри периода пульсара, что делает этот пульсар вторым (после J0953+0755), излучение которого занимает больше 90% периода. У J2234+2114 обнаружен предимпульс, отстоящий от главного импульса на расстоянии 53° , который ранее не описывался, и имеющий относительную амплитуду 0,1.

Личный вклад диссертанта

Личный вклад диссертанта во всех результатах, выносимых на защиту, является определяющим. Методика обработки данных наблюдений пульсаров разрабатывалась автором

совместно с научным руководителем, все расчеты выполнялись по программам, написанным лично автором (с использованием сторонних библиотек на языках Си и C++), результаты анализировались совместно с научным руководителем.

Все публикации по теме диссертации выполнены в соавторстве, по двум статьям автор является первым соавтором.

Рисунки 0.1, 0.4, 0.5, I.4 – I.11, II.1, III.4 – III.12, IV.1 – IV.5 в диссертации получены лично автором. Рисунки 0.2, 0.3, I.1 – I.3, III.1 – III.3 в диссертации получены другими авторами, ссылки приведены.

Список публикаций диссертанта

Основные результаты диссертации изложены в 7 научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

1) Торопов М.О., Тюльбашев С.А., Бескин В.С. Поиск интеримпульсов в полной выборке пульсаров на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. – 2024. – Т. 101. – №. 12. – С. 1084-1094. (*Toropov M. O., Tyul'bashev S. A., Beskin V. S. Search for interpulses in a complete sample of pulsars at a frequency of 111 MHz // Astronomy Reports. – 2024. – T. 68. – №. 12. – C. 1191-1201.*)

2) Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Поиск слабых компонентов в радиоизлучении пульсаров // *Астрономический журнал*. – 2024. – Т. 101. – №. 12. – С. 1078-1083. (*Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Search for weak components in pulsar radiation // Astronomy Reports. – 2024. – T. 68. – №. 12. – C. 1185-1190.*)

3) Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Вариации интенсивности излучения пульсара B0950+08: 9 лет мониторинга на частоте 110 МГц // *Астрономический журнал*. – 2024. – Т. 101. – №. 8. – С. 753-763. (*Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Variations in the Radiation Intensity of Pulsar B0950+08: Nine Years of Monitoring at 110 MHz // Astronomy Reports. – 2024. – T. 68. – №. 8. – C. 828-837.*)

4) Toropov M.O., Tyul'bashev S.A., Smirnova T.V., Samodurov V.A., Ovchinnikov I.L. Study of the variability and components of the pulsar B0823+26 at a frequency of 111 MHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2024. – Т. 527. – №. 1. – С. 1594-1600.

5) Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Долгушев А.В., Орешко В.В., Логвиненко С.В. Обнаружение двух новых RRAT на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. – 2023. – Т. 100. – №. 6. – С. 517-523. (*Samodurov V.A., Tyul'bashev S.A., Toropov M.O., Dolgushev A.V., Oreshko V.V., Logvinenko S.V. Detection of Two New RRATs at 111 MHz // Astronomy Reports. – 2023. – T. 67. – №. 6. – C. 590-595.*)

6) Самодуров В. А., Тюльбашев С. А., Торопов М. О., Долгушев А. В., Орешко В. В., Логвиненко С. В., Исаев Е. А. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со

склонениями от $+52^\circ$ до $+56^\circ$ на частоте 111 МГц // Труды ИПА РАН. – 2023. – Вып. 66. – С. 37-44.

7) Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Логвиненко С.В. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+42^\circ$ до $+52^\circ$ на частоте 111 МГц //Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. – №. 4. – С. 334-341. (*Samodurov V.A., Tyul'bashev S.A., Toropov M.O., Logvinenko S.V. Detection Statistics of Pulse Signals at Declinations from $+42^\circ$ to $+52^\circ$ at the Frequency 111 MHz //Astronomy Reports. – 2022. – Т. 66. – №. 4. – С. 341-347.*)

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

1) В. А. Самодуров, С. А. Тюльбашев, М. О. Торопов, А. В. Долгушев, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко, «Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+52^\circ$ до $+56^\circ$ на частоте 111 МГц» //Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2022) 19–23 сентября 2022 г.

2) Т. В. Смирнова, М. О. Торопов, С. А. Тюльбашев, В. А. Самодуров. «Исследование переменности излучения пульсара B0823+26 от секунд до нескольких лет» //Конференция Физика нейтронных звёзд 10-14 июля 2023 г., Санкт-Петербург.

3) T.V. Smirnova, M.O. Toropov, S.A. Tyul'bashev «Search for weak components in the radio emission of pulsars at a frequency of 110 MHz» //International pulsar symposium 2024, December 12-17th, 2024, Howard Johnson Qunsheng Plaza, GuiYang, China.

Работы также представлялись на семинарах ПРАО АКЦ ФИАН.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей четыре главы, заключения, списка литературы, списка использованных сокращений, списка таблиц, списка иллюстративного материала и приложений. Работа содержит 123 страницы машинописного текста, 38 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 144 наименований на 11 страницах, 2 приложений.

Содержание диссертации

Во введении дан обзор по истории открытия радиопульсаров различных классов, описаны особенности средних профилей пульсаров (нуллинг, переключение мод, гигантские импульсы, интеримпульс), приведены характеристики пульсаров (наблюдательные, энергетические), указаны требования к радиотелескопу и проблемы в поиске вращающихся радиотранзиентов, затронута проблема эволюции угла наклона между магнитным моментом и осью вращения нейтронной звезды, а также основные результаты, полученные к настоящему времени. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, описана научная новизна и цель работы, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, приведен список публикаций диссертанта и отражен его личный вклад.

В главе I описан радиотелескоп БСА ФИАН, на котором выполнялись наблюдения, приведены его основные характеристики (площадь, чувствительность), указаны характеристики его приёмно-записывающей аппаратуры. Описаны методика наблюдений радиопульсаров, калибровки и обработки данных, а также методика поиска радиотранзиентов.

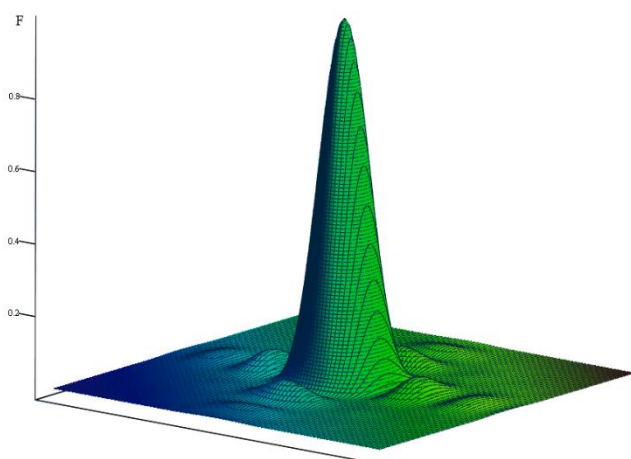


Рис. 1 Вид идеальной диаграммы (одного из лучей) направленности БСА в трёх измерениях [2].

Форма диаграммы единичного луча БСА аппроксимируется функцией интегрального квадратного синуса $[\sin(x)/x]^2$ (рис. 1), размер луча примерно $0,5^\circ \times 1^\circ$. Ввиду того, что направления лучей БСА фиксированы, то при нахождении радиоисточника между положениями максимумов диаграммы направленности каждого из двух соседних лучей радиотелескопа амплитуда отклика в отдельных лучах оказывается заметно меньше, чем, если бы склонение источника совпадало с положением максимума одного из лучей. Используя отношения амплитуд откликов (A_1 и A_2) одного и того же источника в двух соседних лучах, необходимо выполнить процедуру расчёта приведения амплитуды отклика источника к максимуму луча.

Коэффициент поправки k_{12} для приведения к максимуму для 1-го луча:

$$k_{12} = \frac{\left(\frac{\pi}{1 + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}} \right)^2}{\sin^2 \left(\frac{\pi}{1 + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}} \right)}, \quad (1)$$

Таким образом, зная отношение амплитуд откликов в двух соседних лучах можно найти, насколько отличается склонение радиосточника от максимумов этих двух лучей и рассчитать, какова была бы амплитуда отклика, если бы его склонение совпадало с положением максимума луча.

Описана процедура калибровки данных наблюдений радиотелескопа БСА, выполняемая последовательно в 2 этапа, сначала по шумовым сигналам известной температуры – перевод из оцифрованных вольт в градусы, далее по калибровочным радиосточникам температуры – перевод из градусов в янские (рис. 2). Калибровочные радиосточники с известными (и постоянными) плотностями потоками [3] выбраны из каталогов радиосточников 3С и 4С (Третий и Четвертый Кембриджский каталоги радиосточников) [4] по следующим требованиям:

- имеющие постоянную плотность потока на центральной частоте радиотелескопа не менее 20Ян;
- равномерно расположенные в рабочем диапазоне склонений БСА3 $-8^\circ < \delta < +55^\circ$, как по прямому восхождению, так и по склонению;
- обладающие малыми угловыми размерами;
- не имеющие в окрестностях своих координат достаточно мощных радиосточников (для исключения эффекта взаимовлияния).

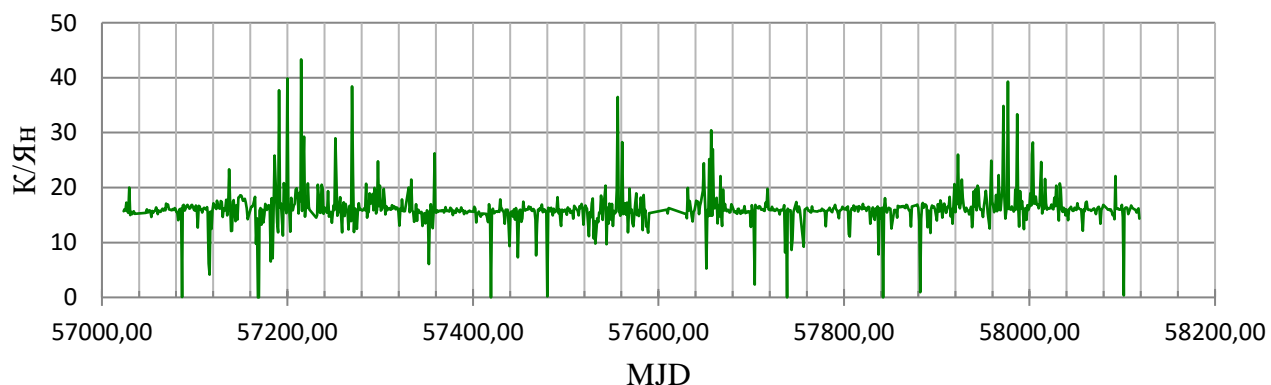


Рис. 2 Коэффициент $K/\text{Ян}$, определённый по радиосточнику 3C405. Ось y – коэффициент $K/\text{Ян}$, ось x – время в днях. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

При калибровке по калибровочным радиосточникам процедура расчёта коэффициента перевода градусов в янские ($K/\text{Ян}$) использует для снижения влияния ионосферы три ближайших

по прямому восхождению (весовой коэффициент 0,7) и склонению (весовой коэффициент 0,3) к пульсару (α, δ) радиоисточников (α_i, δ_i) : $[0,7 \cdot |\alpha - \alpha_i| + 0,3 \cdot |\delta - \delta_i|] \xrightarrow{\min} i$.

Индивидуальные импульсы радиоизлучения данного пульсара, субимпульсы, могут быть совершенно непохожими друг на друга, однако после усреднения порядка нескольких сотен таких субимпульсов формируется средний профиль, остающимся неизменным при последующих усреднениях и является оригинальным для каждого пульсара.

Для формирования среднего профиля пульсара за сеанс обработка исходных данных проводится следующим образом:

1) По координате пульсара (α, δ) на 2000 год (J2000) из каталога пульсаров ATNF определяется момент кульминации пульсара $T_{\text{кул}}$ на широте местонахождения БСА3 на день наблюдений, и дополнительно делается поправка за наклон антенны в зависимости от значения склонения пульсара.

2) От момента кульминации $T_{\text{кул}}$ в каждую сторону откладываются временные отрезки (по половинной мощности диаграммы направленности антенны). Вырезанные данные с пульсаром нужно усредняются для получения среднего профиля с учетом меры дисперсии с последующим сложением (сворачивание) импульсов пульсара с известным периодом.

3) В каждом среднем профиле, найденном в каждом частотном канале, определяется среднеквадратичное значение шума (сигма шумов) $\sigma_{\text{ш}}$ и новая базовая линия (базовое значение) – постоянное значение, минимизирующее значение сигмы шумов за вычетом импульса и других проявлений активности в профиле (интеримпульсов, предимпульсов, постимпульсов и т.п.).

4) После калибровки складываются все частотные каналы с учетом известной меры дисперсии пульсара для получения конечного среднего профиля. Делаются сдвиги в частотных каналах для учета меры дисперсии.

5) Исследуемый пульсар наблюдается не в зените, его координаты чаще всего попадают между лучами БСА3, направления которых фиксированы на небе, следовательно наблюдаемая плотность потока в среднем профиле меньше, чем должна была бы быть, необходимо внести указанную выше поправку за нахождение источника между лучами.

Следует отметить, что согласно [5] наилучшая практическая чувствительность БСА3 при поиске достигается для пульсаров, у которых $+21^\circ < \delta < +42^\circ$, $0,25 \text{ с} < P < 3 \text{ с}$, $DM < 100 \text{ пк/см}^3$.

Поиск диспергированных импульсных сигналов сопряжен с рядом сложностей. Во-первых, для поиска и исследования отдельных импульсов нужны радиотелескопы, имеющие высокую мгновенную чувствительность, позволяющую найти одиночный импульс на приемлемом отношении сигнала к шуму (S/N). Во-вторых, при поиске новых радиотранзиентов заранее неизвестны ни мера дисперсии импульса, ни ширина его профиля, что увеличивает

количество переборов при поиске. Появление импульсов RRAT непредсказуемо. Типичное время между двумя последовательными импульсами может быть от минут до часов, но может достигать и десятков часов. Таким образом, для поиска помимо антенны с высокой флуктуационной чувствительностью, нужно иметь длительные ряды наблюдений. При отработке методики поиска импульсных диспергированных сигналов найдено 6 новых RRAT [6], [7].

В главе II проведён поиск интеримпульсов в выборке 96 пульсаров, наблюдавшихся на радиотелескопе, Большая Синфазная Антенна (БСА) в Пущинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS). Осуществлён статистический анализ пульсаров с интеримпульсами с целью уточнения модели эволюции угла между магнитной осью и осью вращения, т.е. между магнитным моментом \vec{m} и угловой скоростью $\vec{\Omega}$.

Пульсары, у которых на каждом обороте (периоде) пульсара наблюдаются два импульса, называются пульсарами с интеримпульсами, в которых наряду с более сильными главными импульсами наблюдаются более слабые импульсы – интеримпульсы, расположенные в промежутке между главными импульсами. Эта популяция представляет особый интерес для понимания структуры магнитосферы пульсаров и механизмов их излучения. Они могут быть как соосными, так и ортогональными ротаторами. Для соосных ротаторов интеримпульс может появиться, если детектируемое излучение образуется в двух локальных зонах, находящихся на разных расстояниях от полярной шапки. Ортогональными ротаторами являются источники, у которых наблюдатель видит излучение с обоих полюсов.

Для идеального ортогонального ротатора у наблюдаемых импульсов должны быть близкие наблюдаемые плотности потока. Однако на практике у известных ортогональных ротаторов наблюдаемые плотности потока главного импульса и интеримпульса могут отличаться в несколько раз [8].

Помимо замедления вращения нейтронной звезды, существует и изменение угла между осью вращения и магнитной осью нейтронных звезд. Статистика интеримпульсных пульсаров может дать ключ к решению проблемы эволюции пульсаров как в сторону соосности, так и в сторону ортогональности, поскольку количество интеримпульсных пульсаров (с углами $\gamma \sim 0^\circ$ и с углами $\gamma \sim 90^\circ$) в основном зависит от эволюции угла наклона. При этом статистически должен наблюдаться либо избыток соосных ротаторов, либо избыток ортогональных ротаторов.

Поскольку обзор на БСА3 ведется круглосуточно больше 10 лет, то для каждого пульсара, попадающего в покрываемую площадку накоплено больше 3000 наблюдательных сессий. Для проверки количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, складываются средние профили за доступные дни, улучшая S/N в импульсе, который будем располагать на расстоянии четверти от начала среднего профиля и проверять появление статистически значимых сигналов (вероятных интеримпульсов) на разных расстояниях от импульса. Для увеличения S/N можно

складывать средние профили только тех пульсаров, которые видны в одном сеансе (в одной наблюдательной сессии). Для поиска интеримпульсов в диссертации были выбраны лишь те пульсары, у которых в наблюдательной сессии S/N главного импульса более 6, дополнительно задано также и условие $S/N > 40$ в накопленном среднем профиле, что позволяет зафиксировать полноту выборки по наблюдаемому S/N .

После обработки наблюдений осталось 96 пульсаров, имеющих $S/N > 40$ для главного импульса после суммирования средних профилей, из которых по результатам наблюдений интеримпульс обнаружен у 12 пульсаров (рис. 3). Найденные значения отношения интеримпульса к главному импульсу лежат между 0,4% и 2,3% с медианным значением 1,0 - 1,1%. Для 9 из 12 пульсаров интеримпульсы найдены впервые. 7 пульсаров имеют интеримпульс, располагающийся на фазовых расстояниях близких к 180° относительно главного импульса, для 5 пульсаров расстояния далеки от 180° и они, по-видимому, являются соосными ротаторами.

Селекционный эффект, который драматически уменьшает чувствительность БСА и влияет на общее обнаруживаемое количество пульсаров с интеримпульсами – это межзвездное рассеяние. Помимо этого эффекта на чувствительность влияют также дисперсионное

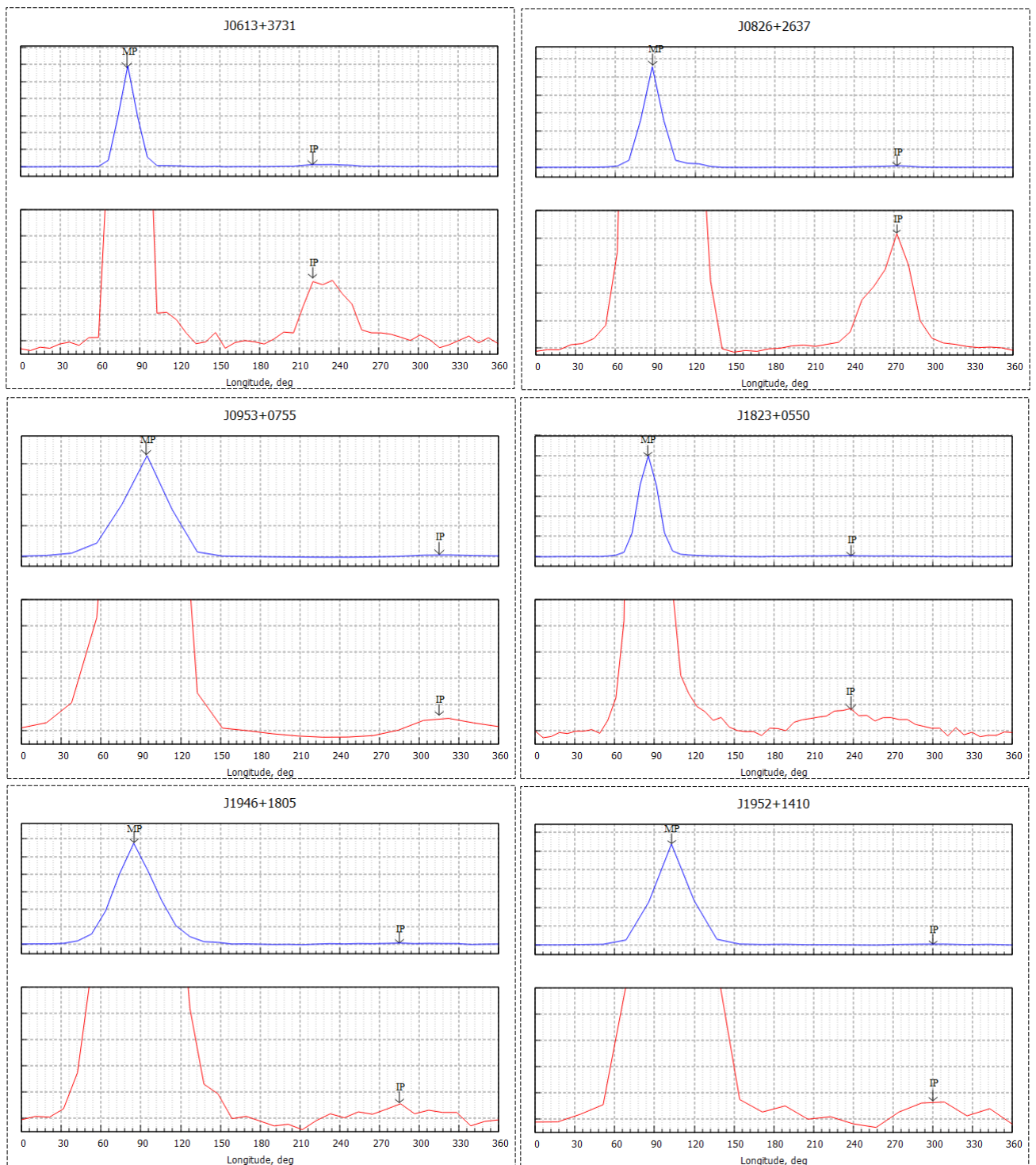


Рис.3 12 парных картинок, на каждой из которых в верхней части показан суммированный средний профиль пульсара. На нижней части убрана вершина главного импульса в профиле так, чтобы был виден интеримпульс. Стрелками на рисунках отмечены положение главного импульса и интеримпульса. Результат диссертанта из работы [9].

сглаживание в частотных каналах, время опроса точки, высота источника в момент прохождения центрального меридиана, индустриальные и другие помехи.

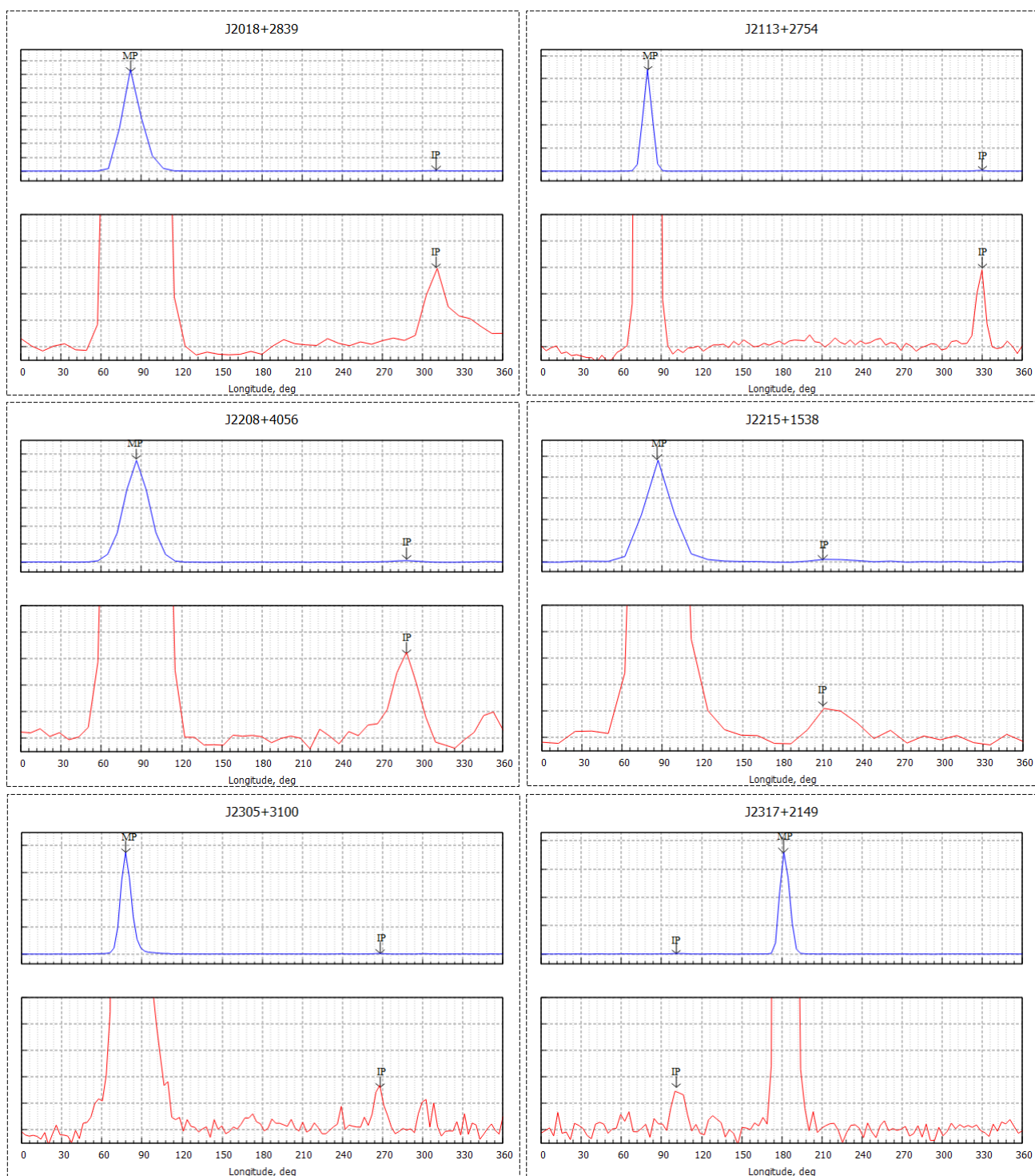


Рис.3 (продолжение) 12 парных картинок, на каждой из которых в верхней части показан суммированный средний профиль пульсара. На нижней части убрана вершина главного импульса в профиле так, чтобы был виден интеримпульс. Стрелками на рисунках отмечены положение главного импульса и интеримпульса. Результат диссертанта из работы [9].

В метровом диапазоне длин волн эффект межзвездного рассеяния помимо ухудшения чувствительности наблюдений приводит к невозможности наблюдений пульсаров с маленькими периодами, т.к. характерное время рассеяния может быть больше, чем период.

В работе [10] были проведены расчеты, оценивающие ожидаемое относительное количество наблюдаемых ортогональных интеримпульсных пульсаров для двух моделей торможения нейтронных звезд. При этом МГД-модель ([11], [12]), в которой угол между магнитной осью и осью вращения стремится к 0° , предсказывает количество ортогональных интеримпульсных пульсаров в интервале $0,033 \text{ с} < P < 0,5 \text{ с}$ на уровне 0,2-1,5%, для БГИ-модели [13], в которой угол между магнитной осью и осью вращения стремится к 90° – на уровне 2,5-5,5%. Таким образом, можно сделать вывод, что результаты статистического анализа интеримпульсных пульсаров полученные в диссертации (как и последние результаты других радиоастрономических обсерваторий) говорят скорее в пользу модели БГИ, чем в пользу общепризнанной модели МГД.

В главе III исследована межзвёздная среда в направлении двух сильных пульсаров J0826+2637 и J0953+0755.

Радиоизлучение от различных источников взаимодействует с межзвёздной средой, что находит своё отражение в получаемом сигнале. Прохождение излучения от пульсаров через неоднородности межзвездной плазмы, вызванной флуктуациями плотности электронов (рис. 4), приводит к целому ряду наблюдаемых эффектов: угловому уширению источника, временному уширению импульсов, модуляции интенсивности излучения по частоте и времени (мерцания). Изучение этих эффектов позволяет исследовать пространственную структуру неоднородностей межзвездной плазмы.

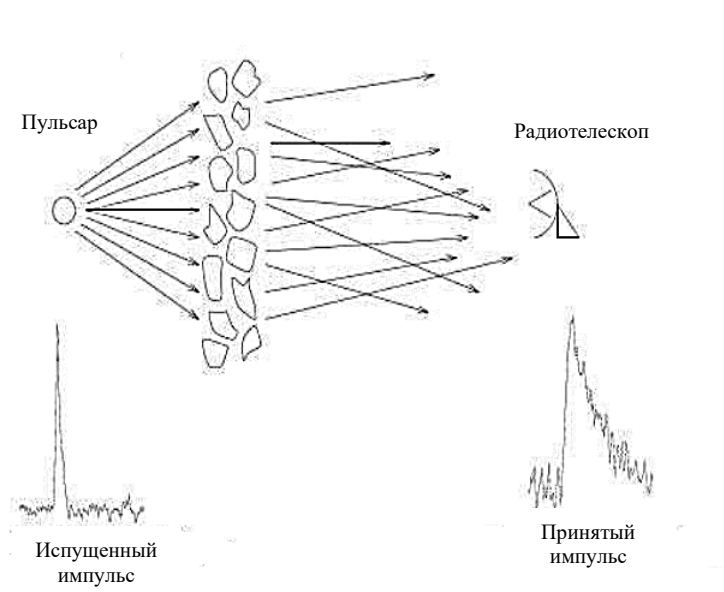


Рис. 4 Рассеивание радиоволн при наблюдениях пульсаров [14].

Структура ионизированной межзвездной среды вдоль луча зрения по направлению к пульсару обычно предполагается турбулентной с широким диапазоном масштабных размеров. Например, если путь радиолуча пролегает через индивидуальные дискретные облака плазмы, они могут значительно влиять на дифракционную картину. Наиболее простейшей является модель

случайного распределения нерегулярностей электронной плотности в холодной плазме, ограниченные тонким экраном, перпендикулярным лучу зрения. Когда радиоволны проходят через межзвёздную среду, они отклоняются благодаря флуктуациям электронной плотности в ионизованной плазме. Поэтому волны, достигающие Земли рассеиваются, что видно в наблюдаемых данных.

Непосредственно позади экрана присутствуют только фазовые вариации волнового фронта. При возрастании расстояния от экрана появляются амплитудные вариации благодаря интерференции между лучами различных частей искажённого волнового фронта. Различия в фазе в отдельных лучах, достигающих наблюдателя от разных частей экрана, зависят от их геометрического пути и различных значений изменения фазы вдоль их пути. Суммарный эффект изменения фазы волнового фронта заключается в рассеивании радиоволны на угол θ_{scat} . Результирующая сумма лучей будет различна для наблюдателей на различных расстояниях A . Следовательно, если дистанция от экрана до наблюдателя равна L и $L\theta_{\text{scat}} > A$, то лучи пересекаются, и возникает интерференционная картина (рис. 5). При этом будут наблюдаться случайные вариации амплитуды, когда источник, или экран, или наблюдатель (или все трое) движутся перпендикулярно линии наблюдения.

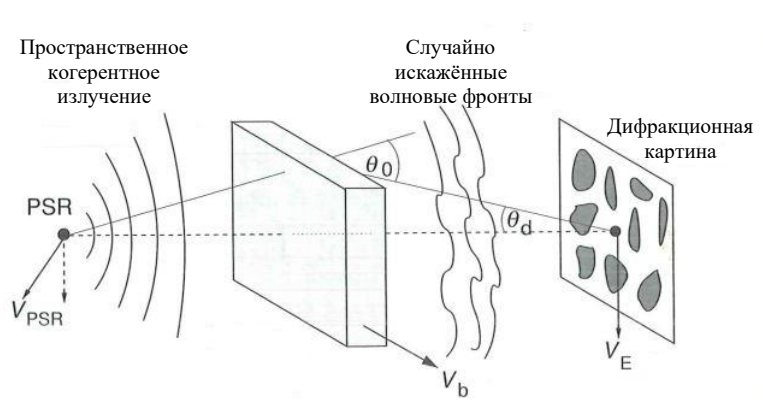


Рис. 5 Рассеяние и искажение когерентного излучения на тонком экране неоднородностей различных размеров [15]. Случайно искажённые волновые фронты, отклонённые на угол θ_0 , формируют дифракционную картину.

Поскольку при распространении излучения радиоволны рассеиваются в угловой спектр с шириной θ_{scat} , то на некотором расстоянии r от рассеивающего слоя взаимная интерференция различных компонент углового спектра приводит к амплитудной модуляции излучения. Различают дифракционные мерцания на масштабах $s_{\text{dif}} = \lambda/\theta_{\text{scat}}$ ($s_{\text{dif}} \sim 10^7$ см на $\lambda = 1$ м) и рефракционные мерцания, которые реализуются на существенно больших пространственных масштабах: $s_{\text{ref}} = \theta_{\text{ref}} \cdot r$ ($s_{\text{ref}} \sim 10^{12}$ см).

Пульсар J0826+2637 – это уникальный пульсар, обладающий целым рядом редких свойств: наличие интеримпульса и посткурсора [16], периодическое рентгеновское излучение [17], нуллинги [18], переключение мод [19], смещение субимпульса. Наблюдаемая интегральная плотность потока этого пульсара достигает одного янского в метровом диапазоне длин волн, что делает этот пульсар одним из самых сильных пульсаров в северном полушарии и, таким образом, легким для наблюдений и исследований объектом. Изучение пульсаров, подобных J0826+2637, позволяет глубже понять взаимосвязь между различными явлениями излучения и то, что они могут рассказать нам о магнитосфере пульсаров.

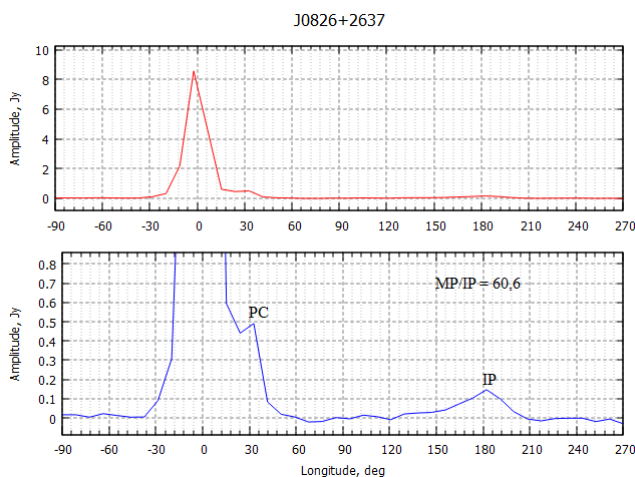


Рис. 6 На верхней панели показан средний профиль J0826+2637, MJD = 57765. На нижней панели изображен тот же профиль, увеличенный по амплитуде в 16 раз. Отмечены посткурсор и интеримпульс. На оси x – долгота в градусах, на оси y – амплитуда в янских. Результат диссертанта из работы [20].

Проведенный в диссертации структурный и корреляционный анализ вариаций амплитуд главного импульса, интеримпульса и посткурсора по J0826+2637 на длительном временном интервале позволили обнаружить характерные временные масштабы 5 дней, 37 дней и один год. Анализ временных вариаций показывает, что временной масштаб 37 дней хорошо объясняется рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, которая распределена в основном квази-однородно на луче зрения. Эти мерцания вносят основной вклад в наблюдаемую переменность. Временной масштаб переменности 5 дней ранее не был известен. Пятидневные мерцания не имеют однозначной интерпретации, но связаны, по-видимому, с рефракцией радиоволн в межзвездной среде. Временной масштаб переменности в один год, также ранее не обнаруживался. Его появление связано, по-видимому, с наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пк от Земли.

Пульсар J0953+0755 один из самых близких по расстоянию и мощных по излучению в метровом диапазоне пульсаров. Он имеет низкоуровневое излучение практически весь период. По-видимому, это связано с тем, что угол между магнитной осью и осью вращения мал (случай соосного ротатора) и наблюдатель видит область излучения в течение всего периода. Кроме главного импульса пульсар имеет интеримпульс, предимпульс и мост излучения между

импульсом и интеримпульсом. Хотя накоплено много наблюдательных данных для пульсара в широком диапазоне частот, однако остается много вопросов о геометрии его магнитосферы, локализации области радиоизлучения и механизме излучения. Следует отметить, что для данного пульсара характерна высокая степень поляризации.

На сильные вариации интенсивности излучения J0953+0755 в широком диапазоне временных масштабов указывалось во многих работах ([21], [22], [23], [24], [25]), что и было подтверждено в диссертации – показана высокая переменность излучения не только от импульса к импульсу, но и на масштабах больше 3 мин. В диссертации впервые был измерен частотный дифракционный масштаб на долготе интеримпульса и показано, что форма спектра и масштаб по частоте одинаковы для главного импульса и интеримпульса. Этот факт также может служить доводом в пользу излучения импульса и интеримпульса с одного полюса и, следовательно, малого угла между магнитным полем и осью вращения. Выявленная в диссертации высокая корреляция между амплитудами импульса и интеримпульса от сеанса к сеансу при нулевом сдвиге по времени обусловлена тремя трудноразделимыми причинами: мерцаниями, поляризацией и ионосферой. Временной масштаб вариаций в 1-2 дня обусловлен в основном рефракционными мерцаниями, поскольку как поляризация, так и дифракционные мерцания не коррелируют ото дня ко дню. В диссертации впервые обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, также связана с рефракционными мерцаниями.

Глава IV посвящена поиску слабых компонент в средних профилях пульсаров J1543+0929 и J2234+2114.

На низких радиочастотах наблюдений, где излучение сосредоточено на больших высотах от поверхности нейтронной звезды, конус открытых силовых линий широкий и излучение может наблюдаться в значительной области долгот профиля, даже если угол между осью вращения и магнитной осью не является малым. Излучение вне главного импульса, распределённого в широкой области долгот среднего профиля, является межимпульсным (интеримпульсным), образующееся от ряда более слабых источников, распределённых в широкой области долгот магнитосферы пульсара. Протяжённый компонент на низких частотах может наблюдаться почти весь период, при этом его интенсивность растёт с уменьшением частоты, и энергия может сравняться с энергией главного импульса или даже превысить её. Для обнаружения возможного интеримпульсного излучения малой интенсивности, неравномерного распределённого по долготе профиля, необходимы наблюдения с высоким отношением S/N и знание окружающего фонового излучения (поведения шумовой дорожки вне импульса пульсара) [26].

Открытие межимпульсного излучения связано в первую очередь с очень высоким S/N в накопленном за многие годы среднем профиле. Уровень обнаруженного сигнала

межимпульсного излучения в несколько раз ниже, чем уровень сигнала в прекурсоре и составляет доли процента от сигнала главного импульса. В результате анализа суммарных за 10 лет средних профилей пульсаров J1543+0929 и J2234+2114 удалось обнаружить особенности, которые ранее в литературе не отмечались.

У пульсара J1543+0929 обнаружено излучение практически в течение всего периода. На рис. 7 показан суммарный средний профиль J1543+0929 за все годы наблюдения с двойным периодом. Видно, что лишь в небольшой части среднего профиля (меньше 10% от полного периода) излучение отсутствует.

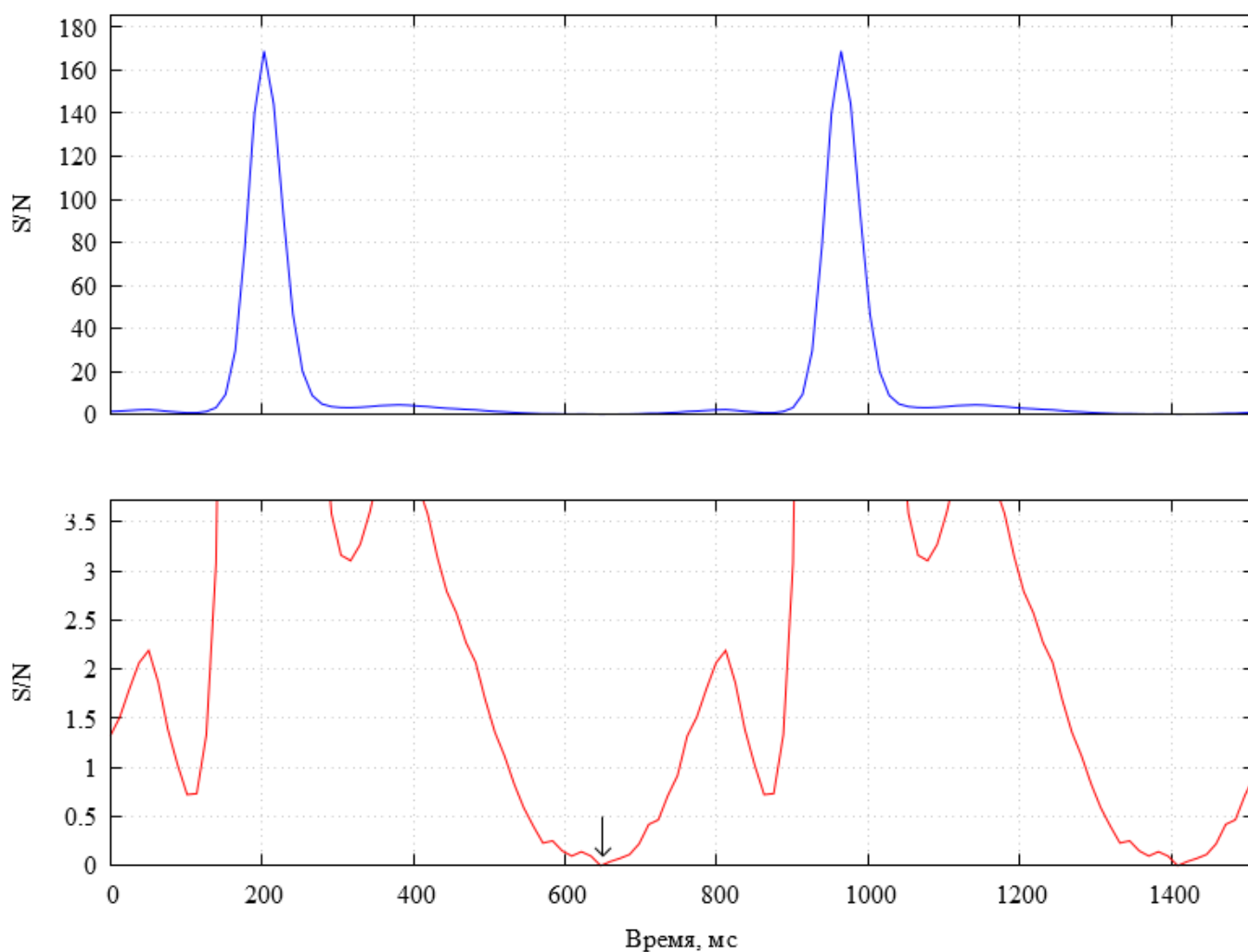


Рис. 7 Накопленный за 10 лет средний профиль (2883 сеанса) пульсара J1543+0929 приведены с двойным периодом. Внизу - оригинальный профиль, сверху - тот же профиль с амплитудой, увеличенной в 50 раз. На верхней части рисунка хорошо виден прекурсор и посткурсор. Стрелка показывает минимум излучения, занимающий несколько точек в профиле. Ось x - время в мс, ось y - амплитуда профиля в отношении сигнал/шум. Результат диссертанта из работы [27].

Пульсар J1543+0929 имеет низкоуровневое излучение (межимпульсное излучение) практически на всех долготах внутри периода пульсара. По-видимому, это всего лишь второй (после J0953+0755) пульсар, излучение которого занимает больше 90% периода. Вероятнее всего,

это излучение связано с тем, что пульсар является соосным. Его угол между осью вращения и магнитной осью мал и поэтому наблюдатель может видеть область излучения в течение всего периода.

У J2234+2114 обнаружен предимпульс, отстоящий от главного импульса на расстоянии 53° , который ранее не описывался, и имеющий относительную амплитуду 0,1 (рис. 8). На частотах 345 МГц и 430 МГц профиль имеет более сложный вид, по-видимому, с тремя компонентами.

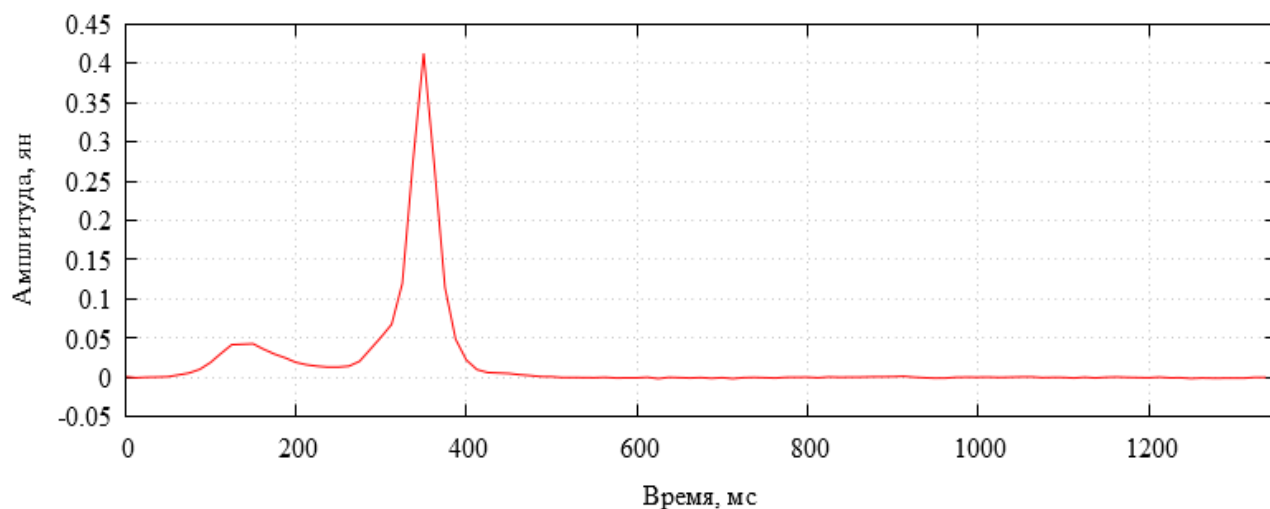


Рис. 8 Накопленный за 10 лет (2014-2023, 2990 сеансов) средний профиль J2234+2114. Результат диссертанта из работы [27].

В **заключении** кратко сформулированы основные выводы, результаты диссертации, перечислены основные научные задачи системы мониторинга БСАЗ, в том числе и Пушинский многолучевой поиск пульсаров (PUMPS).

Заключение

Настоящая диссертационная работа посвящена отдельным результатам ежедневных мониторинговых наблюдений пульсаров на многолучевом радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСАЗ) Физического института им. П.Н.Лебедева (ФИАН) в Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS).

Разработана методика обработки наблюдений, позволяющая корректно складывать сигналы от пульсаров за разные дни, не прибегая к таймингу. Разработана методика отсеивания импульсных помех, которая позволяет проводить поиск импульсных диспергированных сигналов.

При поиске импульсных сигналов удалось обнаружить 6 новых вращающихся радиотранзиентов.

Проведен поиск интеримпульсов в выборке 96 сильнейших пульсаров. Выборка пульсаров является полной для пульсаров, имеющих отношение сигнала к шуму в главном импульсе больше 40 на частоте 110,25 МГц. Для поиска слабых интеримпульсов использовалось сложение средних профилей на интервале 10 лет. У 12 пульсаров обнаружены интеримпульсы (12,5% от выборки проверенных пульсаров), из них у 7 пульсаров интеримпульс располагается вблизи фазы 180° относительно главного импульса, а у 5 на фазах, далеких от 180° . Найденное количество пульсаров с интеримпульсами в 2,5 раза больше, чем ожидалось найти в выборке. Проведена статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, подтверждающая модель, согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными, а не общепризнанную модель, по которой магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

Проведен анализ вариаций интенсивности излучения пульсара J0953+0755 с 2014 по 2022 г. Показана высокая переменность излучения не только от импульса к импульсу, но и на масштабах больше 3 мин. Средняя относительная амплитуда интеримпульса составляет $2,00 \pm 0,28$ % от главного импульса. В индивидуальных импульсах амплитуда интеримпульса может превышать амплитуду главного импульса, однако это редкое событие. Излучение наблюдается практически во всем периоде пульсара. Впервые измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом (мост излучения). При усреднении порядка 10 часов она меняется от 0,8% до 1,31% со средним значением $1,04 \pm 0,28$ %. Обнаружена высокая корреляция между вариациями амплитуды главного импульса и интеримпульса как при усреднении профилей за 3,2 мин, так и при усреднении по годам. Эта корреляция обусловлена рефракционными межзвездными мерцаниями. Впервые измерен частотный масштаб дифракционных межзвездных мерцаний интеримпульса и показано, что формы спектра для интеримпульса и главного импульса хорошо коррелируют и имеют одинаковый частотный масштаб. Наблюдаются сильные вариации частотного масштаба мерцаний f_{dif} от сеанса к сеансу ($t > 3,2$ мин) на масштабах 200-800 кГц. Определен рефракционный масштаб мерцаний 1-2 дня. Обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, также связана с рефракционными мерцаниями.

Проведены исследования пульсара J0826+2637 с 2014 по 2020 г. На интервале 5,5 лет в ежедневных сеансах длительностью порядка 3,7 мин оценивались амплитуды главного импульса, посткурсор и интеримпульса. Показано, что отношение средних амплитуд главного импульса в яркой («В») и спокойной («Q») модах равно 60. Для «В»-моды среднее отношение амплитуд главного импульса к интеримпульсу равно 65, а для главного импульса к посткурзору – 28. Число сеансов с нуллином составляет 4% от общего числа сеансов. Структурный и корреляционный

анализ вариаций амплитуд главного импульса, посткурсора и интеримпульса на длительном временном интервале позволили обнаружить характерные временные масштабы 5 дней, 37 дней и один год. Анализ временных вариаций показывает, что временной масштаб 37 дней хорошо объясняется рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, которая распределена в основном квази-однородно на луче зрения. Эти мерцания вносят основной вклад в наблюдаемую переменность. Временной масштаб переменности 5 дней обнаружен впервые. Пятидневные мерцания не имеют однозначной интерпретации, но связаны, по-видимому, с рефракцией радиоволн в межзвездной среде. Временной масштаб переменности в один год, также ранее не обнаруживался. Его появление связано с наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пк от Земли.

Проведен поиск слабых компонент вне главного импульса в излучении пульсаров на частоте 110,25 МГц. Выборка включала 96 пульсаров, для которых отношение сигнала к шуму в главном импульсе среднего профиля при накоплении за 10 лет было больше 40. Было обнаружено, что J1543+0929 имеет излучение практически весь период. Профиль является трехкомпонентным. Относительные амплитуды боковых слабых компонент составляют 0,013 и 0,025. Для J2234+2114 был обнаружен предимпульс, отстоящий от главного импульса на 53° .

Пушчинский многолучевой поиск пульсаров (PUMPS) включает в себя три отдельных подзадачи поиска: секундных пульсаров при чувствительности лучше 1 мЯн, быстрых радиовсплесков (FRB), вращающихся радиотранзиентов (RRAT). Помимо указанных выше задач, обзор PUMPS далеко не исчерпан и класс задач, которые можно решить на системе мониторинга БСАЗ, необычайно широк, причем это не только фундаментальные научные задачи, но и прикладные – при этом предлагаемый проект позволяет непрерывно отслеживать небесные радиоисточники на большей части небосвода на временных масштабах от миллисекунд до лет.

Список литературы

1. BSA-Analytics [Электронный ресурс] URL: <https://bsa-analytics.prao.ru/pulsars/> (дата обращения: 19.12.2025).
2. Пушинская Радиоастрономическая Обсерватория [Электронный ресурс] URL: <https://www.prao.ru/> (дата обращения: 17.01.2026).
3. Самодуров В.А. Пушинский обзор на 102,5 МГц: обработка данных и составление каталога радиоисточников // Препр. ФИАН, № 11, 2000. С. 55.
4. Third Cambridge Catalogue of Radio Sources & Fourth Cambridge Survey [Электронный ресурс] URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR-4> (дата обращения: 17.01.2026).
5. Tyul'bashev S. A., Tyul'basheva G. E., Kitaeva M. A. et al. Pushchino multibeam pulsar search – IV. Detection of new pulsars at declinations $-9^\circ >$
6. Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Долгушев А. В., Орешко В. В., Логвиненко С.В. Обнаружение двух новых RRAT на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 100, № 6, 2023. С. 517-523.
7. Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Логвиненко С.В. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+42^\circ$ до $+52^\circ$ на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 99, № 4, 2022. С. 334-341.
8. Maciesiak K., Gil J., Ribeiro V. A. R. M. On the pulse-width statistics in radio pulsars—I. Importance of the interpulse emission // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 414, No. 2, 2011. pp. 1314-1328.
9. Торопов М.О., Тюльбашев С.А., Бескин В.С. Поиск интеримпульсов в полной выборке пульсаров на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 101, № 12, 2024. С. 1084-1094.
10. Novoselov E. M., Beskin V. S., Galishnikova A. K. et al. Orthogonal pulsars as a key test for pulsar evolution // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 494, No. 3, 2020. pp. 3899-3911.
11. Philippov A., Tchekhovskoy A., Li J. G. Time evolution of pulsar obliquity angle from 3D simulations of magnetospheres // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 441, No. 3, 2014. pp. 1879-1887.
12. Spitkovsky A. Time-dependent force-free pulsar magnetospheres: axisymmetric and oblique rotators // *The Astrophysical Journal*, Vol. 648, No. 1, 2006. P. 51.

13. Beskin, V. S., Gurevich, A. V., Istomin, Y. N. Physics of the pulsar magnetosphere. Cambridge university press, 1993.
14. Rajwade K. Radio Transients and their Environments. West Virginia University, 2017.
15. Lorimer D. L., Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge University Press, 2005.
16. Backer D. C., Boriakoff V., Manchester R. N. Wide integrated pulse profiles of pulsars // Nature Physical Science, Vol. 243, No. 127, 1973. pp. 77-78.
17. Becker W. et al. Revealing the X-Ray emission processes of old rotation-powered pulsars: XMM-newton observations of PSR B0950+08, PSR B0823+26, and PSR J2043+2740 // The Astrophysical Journal, Vol. 615, No. 2, 2004. P. 908.
18. Hesse K. H., Wielebinski R. Pulse intensity histograms of pulsars // Astronomy and Astrophysics, Vol. 31, 1974. P. 409.
19. Sobey C., Young N.J., Hessels J.W.T. et al. LOFAR discovery of a quiet emission mode in PSR B0823+26 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 451, No. 3, 2015. pp. 2493-2506.
20. Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Variations in the Radiation Intensity of Pulsar B0950+08: Nine Years of Monitoring at 110 MHz // Astronomy Reports, Vol. 68, No. 8, 2024. pp. 828-837.
21. Smirnova T.V. Giant pulses from the pulsar PSR B0950+08 // Astronomy Reports, Vol. 56, 2012. pp. 430-440.
22. Singal A. K., Vats H. O. Giant-pulse Emission from PSR B0950+08 // The Astronomical Journal, Vol. 144, No. 5, 2012. P. 155.
23. Kuiack M., Wijers R., Rowlinson A. et al. Long-term study of extreme giant pulses from PSR B0950+08 with AARTFAAC // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 497, No. 1, 2020. pp. 846-854.
24. Bhat N. D. R., Rao A. P., Gupta Y. Long-term scintillation studies of pulsars. I. Observations and basic results // The Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 121, No. 2, 1999. P. 483.
25. Bell M.E. et al. Time-domain and spectral properties of pulsars at 154 MHz // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 461, No. 1, 2016. pp. 908-921.
26. Смирнова Т. В., Шабанова Т. В. Межимпульсное радиоизлучение пульсаров // Труды ФИАН, Т. 199, 1989. С. 68-82.
27. Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Поиск слабых компонентов в радиоизлучении пульсаров // Астрономический журнал, Т. 101, № 12, 2024. С. 1078-1083.