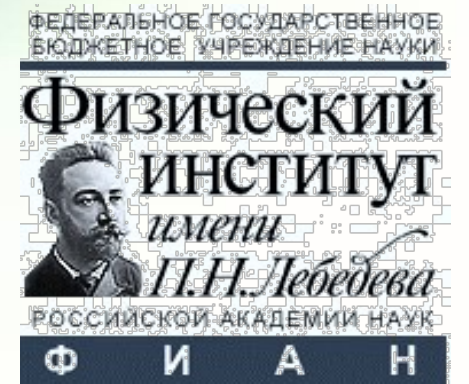




РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Физический институт им. П. Н. Лебедева



ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СИЛЬНЫХ ПУЛЬСАРОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

1.3.1 – физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Торопов Максим Олегович

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Тюльбашев Сергей Анатольевич

Пушкинская радиоастрономическая обсерватория
Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук

Москва, 2026

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:

- 1) получение методики обработки в приложении к данным БСАЗ;
- 2) проверка гипотезы об эволюции соосных и ортогональных ротаторов;
- 3) исследование отдельных пульсаров (исследование межзвездной среды);
- 4) поиск новых компонент в средних профилях.

Радиотелескоп БСА ФИАН



Плоская двумерная эквидистантная фазируемая по одной координате решетка, состоящая из 16384 вибраторов, собранных в 256 рядов по 64 диполя в каждом, ориентированные в направлении Восток-Запад.

Размеры 384×187 м.

Эффективная площадь $\sim 45000 \text{ м}^2$.

Рабочий диапазон работы 109-113 МГц с сектором сканирования 110° .

Антенна принимает линейно-поляризованное излучение.

БСАЗ имеет 128 стационарных лучей, выстроенные в плоскости меридиана, в секторе склонений $-9^\circ < \delta < +55^\circ$ с перекрытием лучей по уровню 0,4, которые снабжены цифровой многоканальной системой регистрации.

Параметры	БСАЗ
Число каналов (лучей) регистрации	128
Полоса частот регистрации с центральной частотой 110,25 МГц	2,5 МГц
Число частотных каналов в одном канале регистрации	32
Интервал выборки сигнала в канале	12,5 мс
Максимальная чувствительность (для всей полосы 2,5 МГц) радиотелескопа БСА, при постоянном времени 12,5мс	0,2 Ян
Чувствительность для одной спектральной полосы (78 кГц)	1,06 Ян

Глава I. Обработка данных на БСАЗ

Поправка на плотность потока

Поправка за попадание источника между лучами:

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

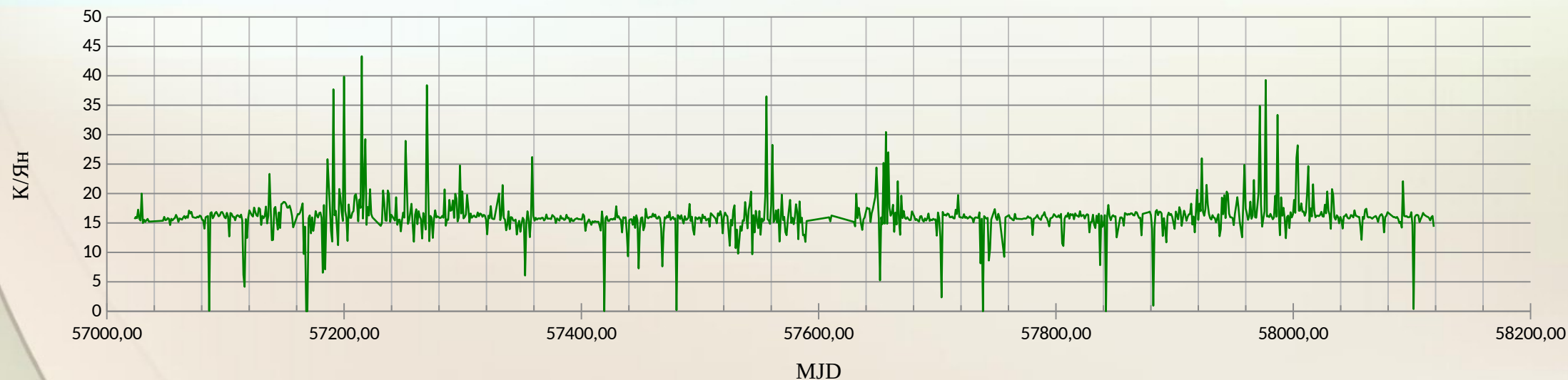
Поправка за зенитное расстояние: $\cos(z)$, где z – зенитное расстояние

Учет ионосферного сдвига координат – сравнение плотности потока калибровочного источника в двух соседних лучах с значением из координат источника:

$$k_{12}^0 = \left[\frac{\pi \frac{\delta_b - \delta}{\delta_b - \delta_r}}{\sin \left(\pi \frac{\delta_b - \delta}{\delta_b - \delta_r} \right)} \right]^2$$

Методика наблюдений и обработки данных

- 1) Калибровка в единицах температуры делается с помощью генератора шума (калибровочная ступенька). Ступенька имеет температуру 2400K и подается одновременно во все лучи БСА.
- 2) Данные в градусах [K] переводятся в янские [Ян] калибровкой по радиоисточникам с известными (и постоянными) плотностями потоками.
- 3) В качестве опорных (калибровочных) источников использовались сильные источники из 3С и 4С каталогов.
- 4) Если ионосферные сдвиги велики, что приводит к большим поправкам, мы не использовали такие данные.



Коэффициент $K/\text{Ян}$, определённый по радиоисточнику 3С405 (Лебедь А – мощная радиогалактика [эллиптическая галактика]).

Ось y – коэффициент $K/\text{Ян}$, ось x – время в днях.

Получение среднего профиля пульсаров

Формирование среднего профиля пульсара за сеанс:

- 1) Определяется момент кульминации пульсара.
- 2) Вырезается отрезок с пульсаром. Данные усредняются с известным периодом в каждом канале независимо.
- 3) В каждом канале определяется сигма шумов ($\sigma_{\text{ш}}$) профиля и новая базовая линия.
- 4) После калибровки в каналах, частотные каналы складываются с учетом DM пульсара.
- 5) Делаются поправки на плотность потока.

Глава II. Интеримпульсное излучение в полной выборке пульсаров

Наблюдения пульсаров с интеримпульсами

Две модели магнитосферы пульсара:

квазианалитическая (БГИ) – в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными, численная магнитогидродинамическая (МГД) – в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

Относительное количество ортогональных интеримпульсных пульсаров в интервале $0,033 \text{ с} < P < 0,5 \text{ с}$:

2,5-5,5% (БГИ),

0,2-1,5% (МГД).

Относительное количество соосных интеримпульсных пульсаров 1-2%.

Для проверки количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, складываются средние профили за доступные дни, улучшая отношение сигнала к шуму (S/N) в импульсе и проверяется появление статистически значимых сигналов (вероятных интеримпульсов) на разных расстояниях от импульса.

Критерии включения пульсара в выборку:

- 1) Отношение сигнал/шум главного импульса $(S/N) > 6$.
- 2) Период пульсаров $P > 0,25 \text{ с}$ (максимальная чувствительность при поиске пульсаров в мониторинговых данных).
- 3) Отношение сигнал/шум $(S/N) > 40$ в накопленном среднем профиле (отношение $IP/MP \geq 0,1$).

Отношение IP/MP для пульсаров с интеримпульсами

Положение интерпульса дается относительно главного импульса, градусы отсчитываются от нуля среднего профиля пульсара, MP находится на фазе 90° , последняя точка среднего профиля соответствует фазе 360° .

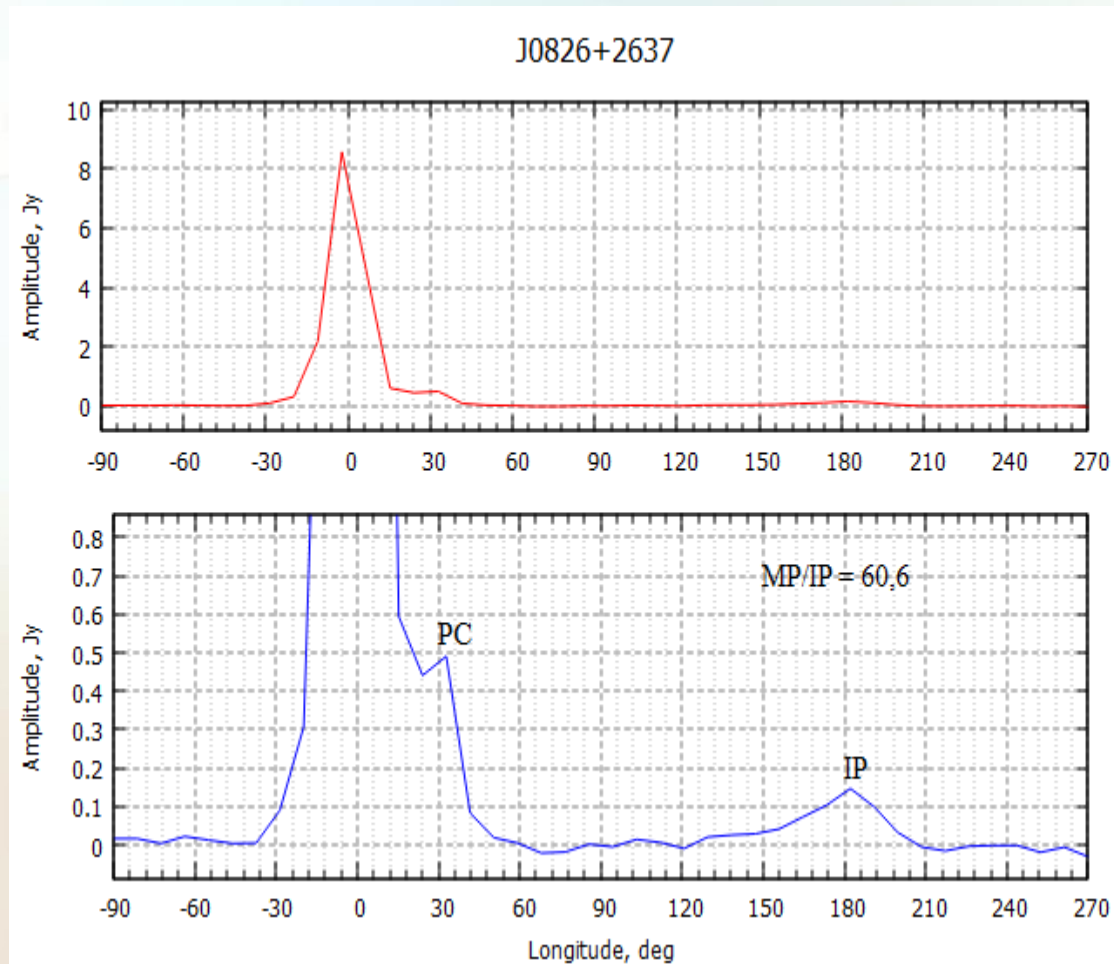
Подчеркнуты пульсары у которых интеримпульсы найдены впервые, курсивом выделены пульсары с $IP/MP > 0,01$.

Имя	P	DM	S/N(MP)	S/N(IP)	IP/MP	r(°)
<u><i>J0613+3731</i></u>	0,6191	18,9	592	11,5	0,019	155±11
<i>J0826+2637</i>	0,5306	19,4	2785	41,6	0,015	180±13
<i>J0953+0755</i>	0,2530	2,96	164	3,6	0,022	216±27
<u>J1823+0550</u>	0,7529	66,7	500	4,2	0,008	140±9
<i>J1946+1805</i>	0,4406	16,1	288	3,3	0,011	195±16
<u>J1952+1410</u>	0,2750	31,5	537	3,3	0,006	188±25
<u>J2018+2839</u>	0,5579	14,1	3683	14,8	0,004	224±12
<u>J2113+2754</u>	1,2028	25,1	2199	14,5	0,007	247±6
<u>J2208+4056</u>	0,6369	11,8	1126	16	0,014	198±11
<u>J2215+1538</u>	0,3741	29,2	240	5,5	0,023	120±18
<u>J2305+3100</u>	1,5758	49,5	840	8,4	0,010	189±5
<u>J2317+2149</u>	1,4446	20,8	1778	7,3	0,004	279±5

P(c)	N _{all}	N _{IP}	N (%)	FAST (%)	MeerKAT (%)
0,03 - 0,5	26	1-2	1,0 - 2,1	2,0	2,4
0,5 - 1	28	0-1	0 - 1,0	0,4	0,5
>1	42	1	1,0	0,3	0,2

Глава III. Межзвездная среда в направлении двух сильных пульсаров (J0826+2637, J0953+0755)

Пульсар J0826+2637

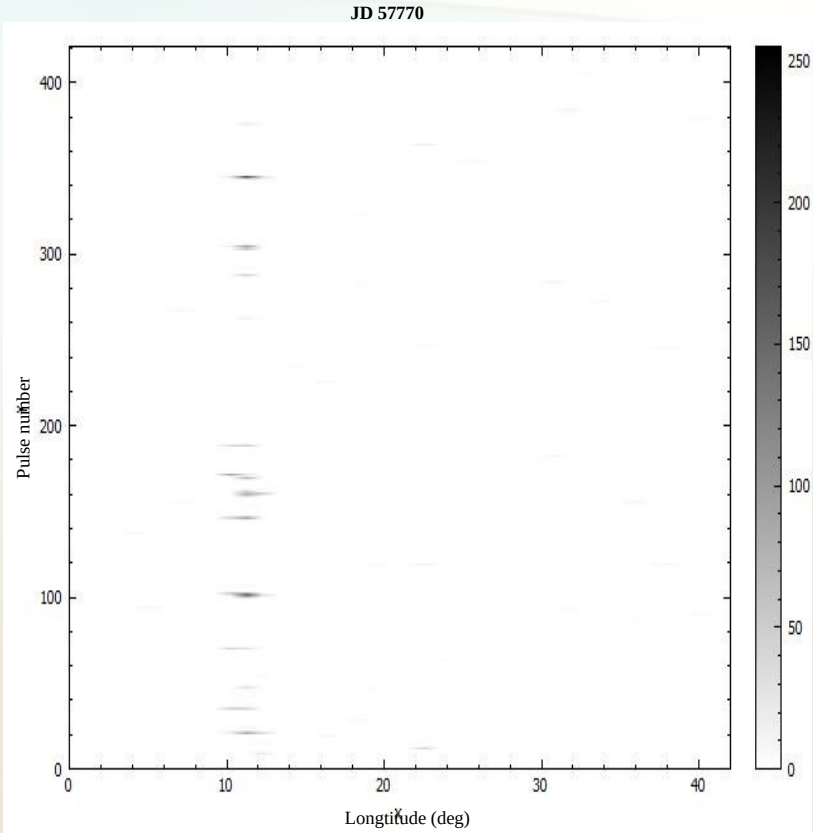
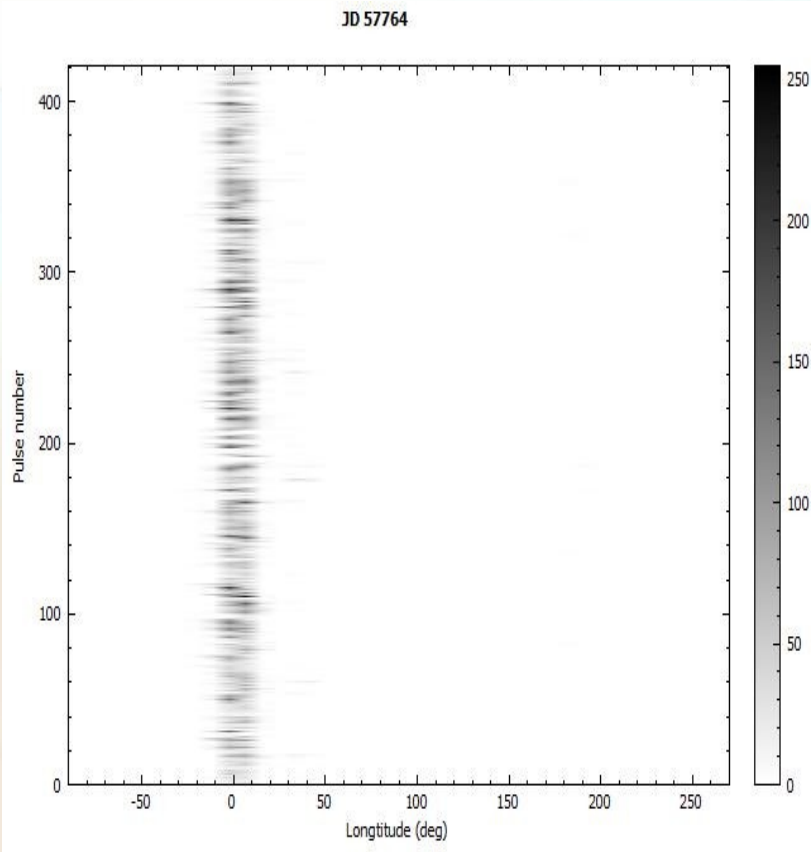


На верхней панели показан средний профиль J0826+2637, MJD = 57765. На нижней панели изображен тот же профиль, увеличенный по амплитуде в 16 раз. Отмечены посткурсор и интеримпульс. На оси x – долгота в градусах, на оси y – амплитуда в янских.

Q-мода и B-мода

J0826+2637 обладает двумя модами: «спокойной» Q-модой и «яркой» В-модой, в среднем значения сигнала к шуму (S/N) в двух модах отличаются на 2 порядка, переход между Q-модой и В-модой происходит синхронно за один период пульсара.

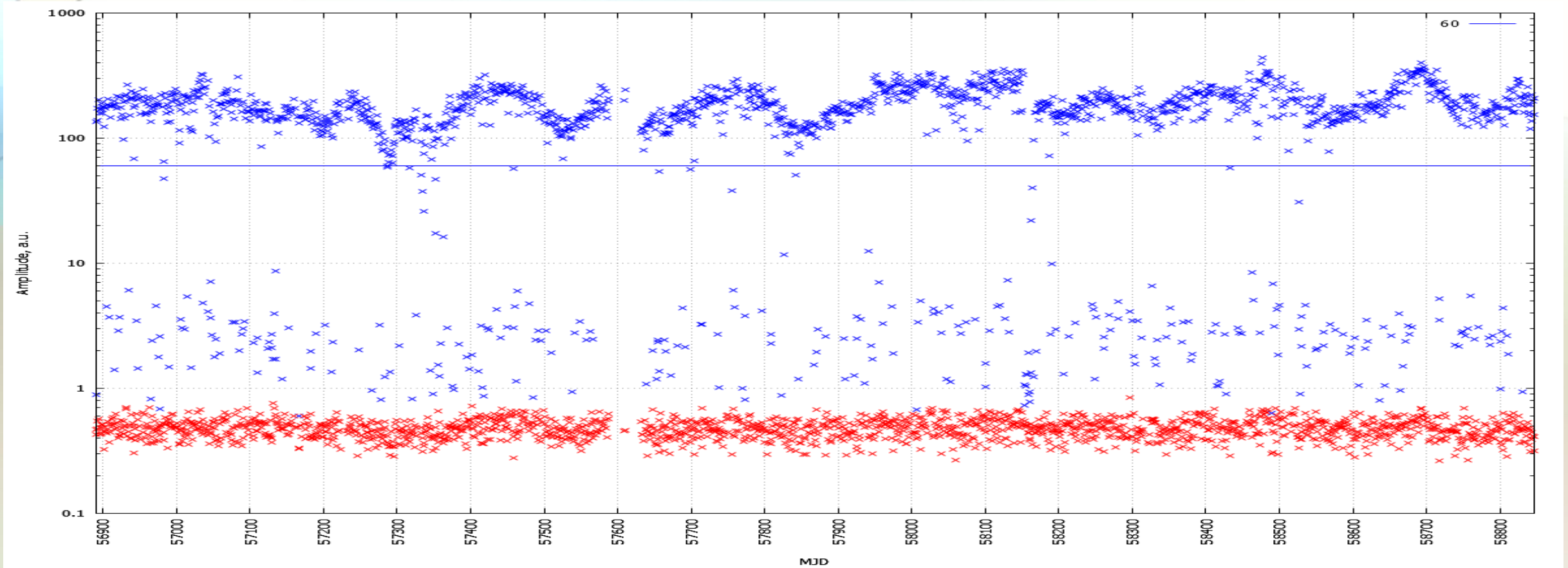
$N_Q, \%$	$N_{\text{null}}, \%$	$\langle A_B \rangle / \langle A_Q \rangle$	$\langle A_{MP} \rangle / \langle A_{PC} \rangle$	$\langle A_{MP} \rangle / \langle A_{IP} \rangle$
12.9	4	60	28.4	65



Левая панель – излучение J0826+37 в «В»-модe (сеанс JD 57764). Правая панель демонстрирует излучение пульсара в «Q»-модe (сеанс JD 57770). Нуллинг для этого сеанса наблюдений занимает 96% времени. На оси y отложен номер импульса, на оси x – долгота в градусах. Цветовая гамма соответствует диапазону амплитуд индивидуальных импульсов от $4\sigma_n$ (белый цвет) до максимального значения (черный цвет) за этот сеанс.

Вариации амплитуд

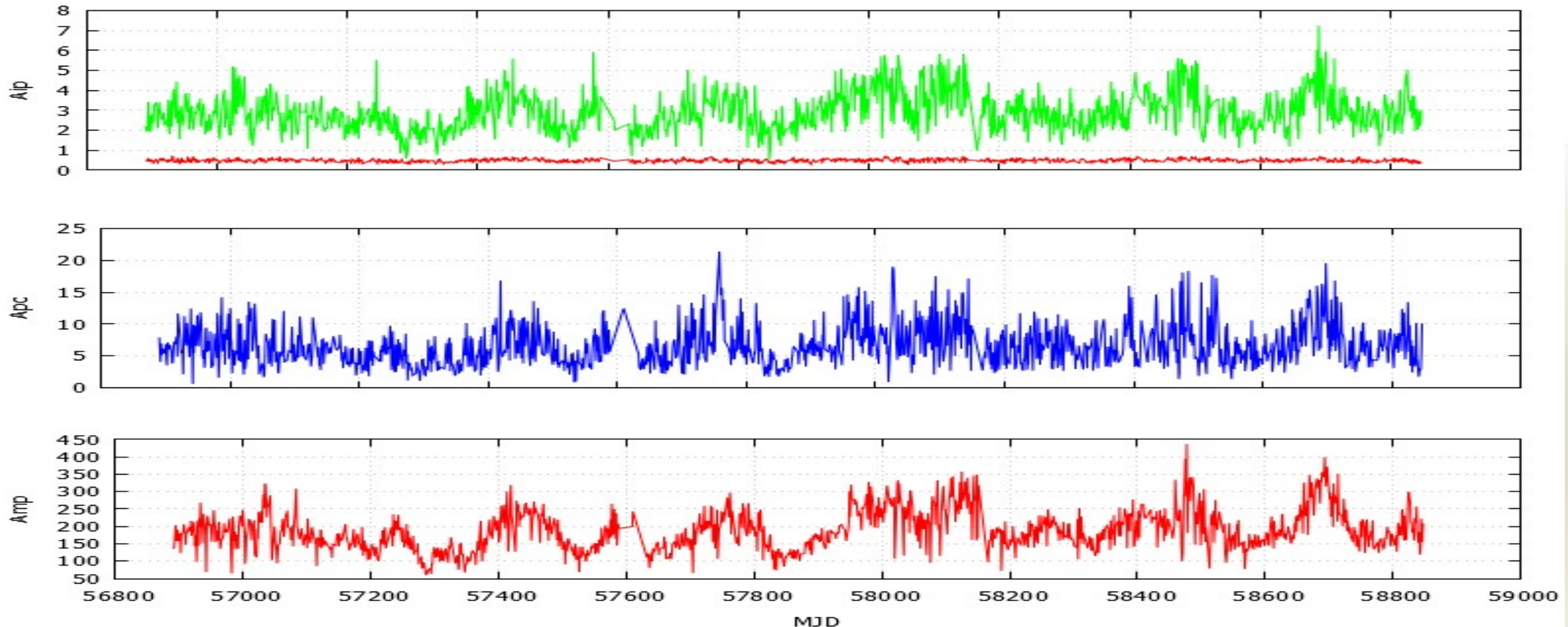
Основная часть амплитуд главного импульса (MP) имеет значения $A_{MP} > 60$ и имеет значительные вариации со временем. Это довольно резкая граница, внутри которой находится 82% всех данных. Другая выделенная часть имеет верхнюю границу $A_{MP} < 10$ и сюда попадают сеансы, в которые реализуется спокойная «Q» мода и нуллинги.



Вариации амплитуды (а.е.) главного импульса со временем (21.08.2014 – 30.12.2019). Ось y – амплитуда в логарифмическом масштабе, ось x – время в модифицированных юлианских днях (MJD). В нижней части рисунка показано изменение сигмы шумов за время наблюдений. Прямая линия соответствует уровню $A_{MP} = 60$.

Вариации амплитуд MP , PC и IP

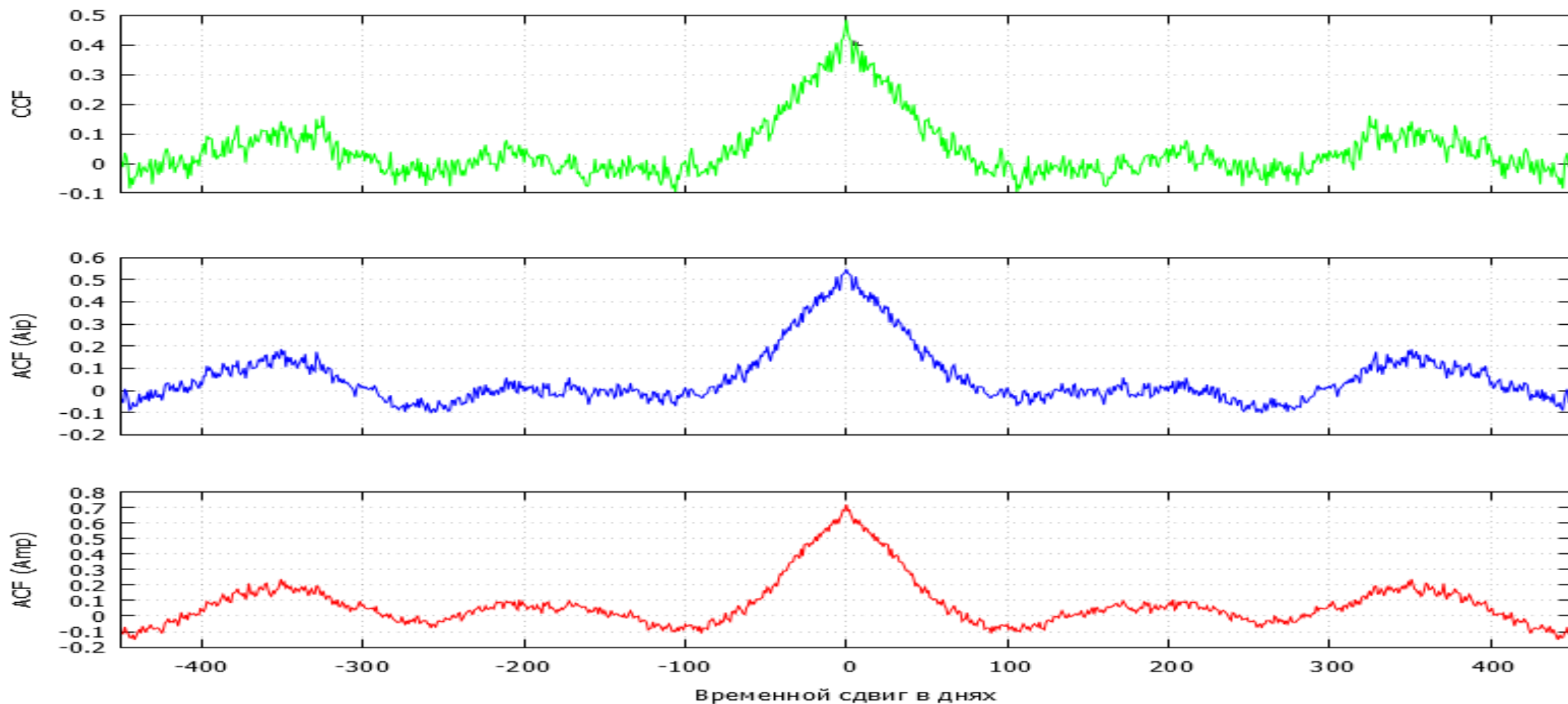
Коррелированные вариации амплитуд главного импульса, посткурса и интеримпульса обусловлены прохождением излучения от пульсара через неоднородности межзвездной плазмы и не связаны с собственной переменностью пульсара. Являются рефракционными мерцаниями на крупных неоднородностях плазмы.



Вариации амплитуд MP , PC и IP со временем в относительных единицах (а.е.). Выбраны только сеансы, в которых $A_{MP} > 60$ («В»-мода). На верхней части рисунка показано также изменение $\langle \sigma_n \rangle$ со временем.

Кросскорреляционные и автокорреляционные функции

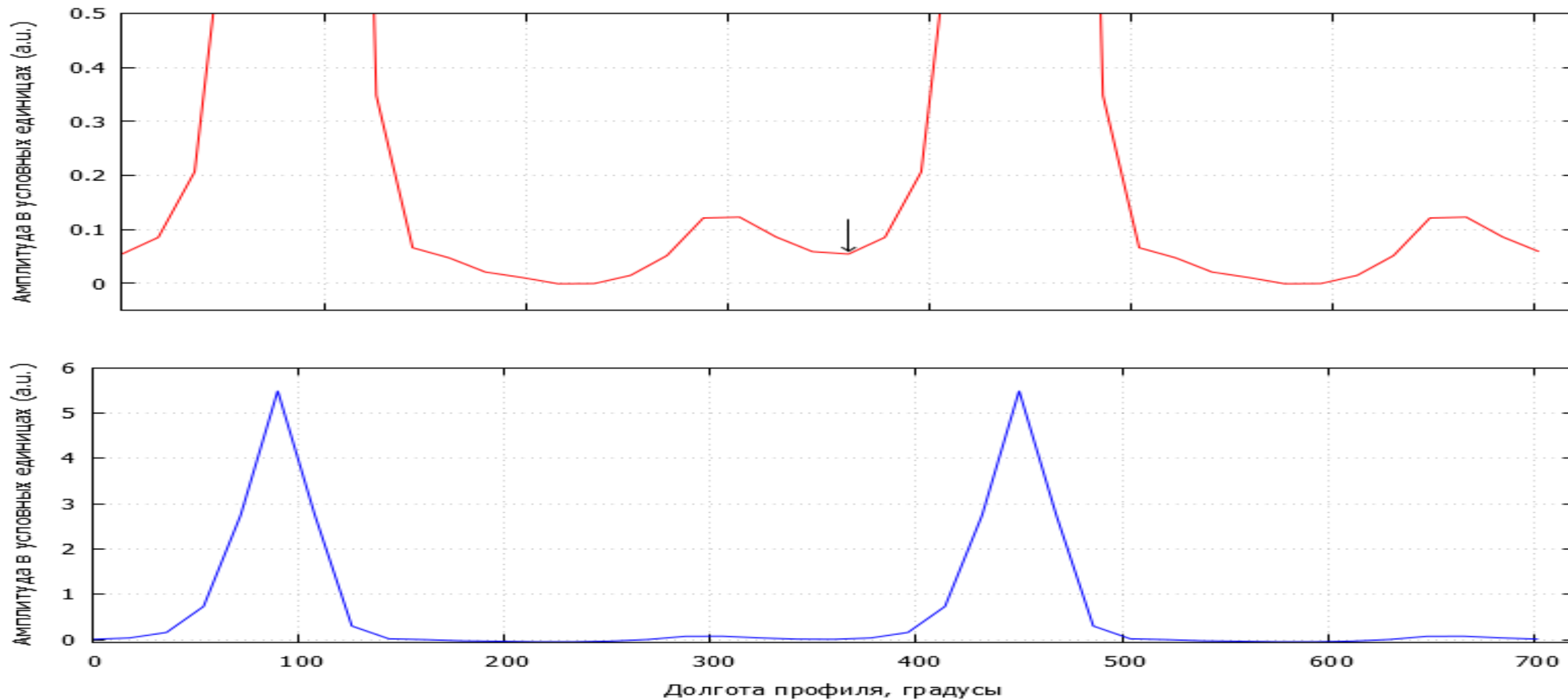
Коррелированные вариации МР и ІР обусловлены рефракцией на одной и той же среде и не являются собственными вариациями излучения пульсара.



Нормированные автокорреляционные функции от вариаций амплитуды МР (нижняя панель) и ІР (средняя панель) для J0826+2637. На верхней панели кросскорреляционная функция между амплитудами МР и ІР.

Пульсар J0953+0755

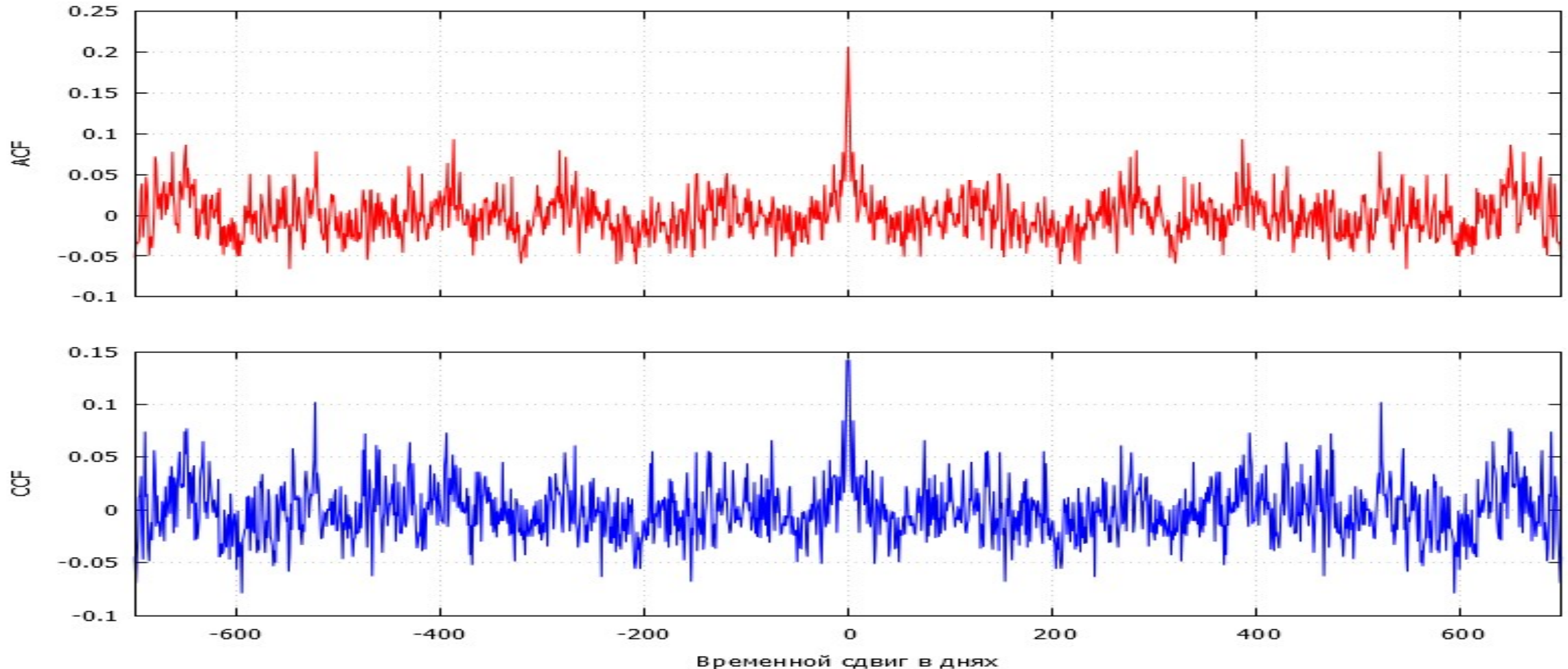
Характерными компонентами профиля пульсара являются: МР, IP и мост. Излучение имеет место практически весь период.



Средний профиль J0953+0755, накопленный за 2014 год (112 сеансов). Стрелкой отмечена долгота, на которой измерялась амплитуда моста (M). Вверху показан этот профиль в увеличенном масштабе, чтобы лучше было видно межимпульсное излучение.

Кросскорреляционные и автокорреляционные функции

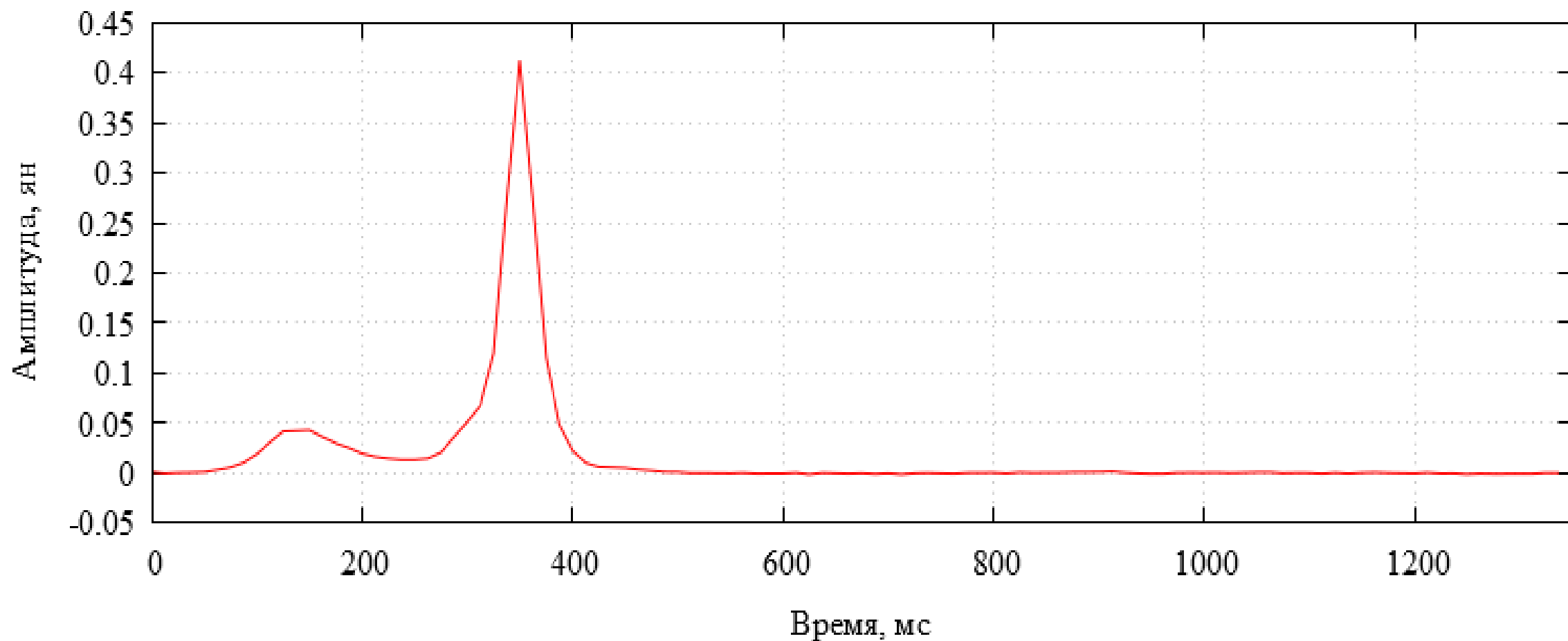
Временной масштаб вариаций в 1-2 дня обусловлен в основном рефракционными мерцаниями, поскольку как поляризация, так и дифракционные мерцания не коррелируют ото дня ко дню. Возможно наличие рефракционного масштаба в 130 дней, связанного с рефракционными мерцаниями на крупных масштабах неоднородностей.



Кросскорреляционная функция между амплитудами средних за сеанс профилей МР и IP (нижняя панель; автокорреляционная функция от вариаций амплитуд МР (верхняя панель) для J0953+0755.

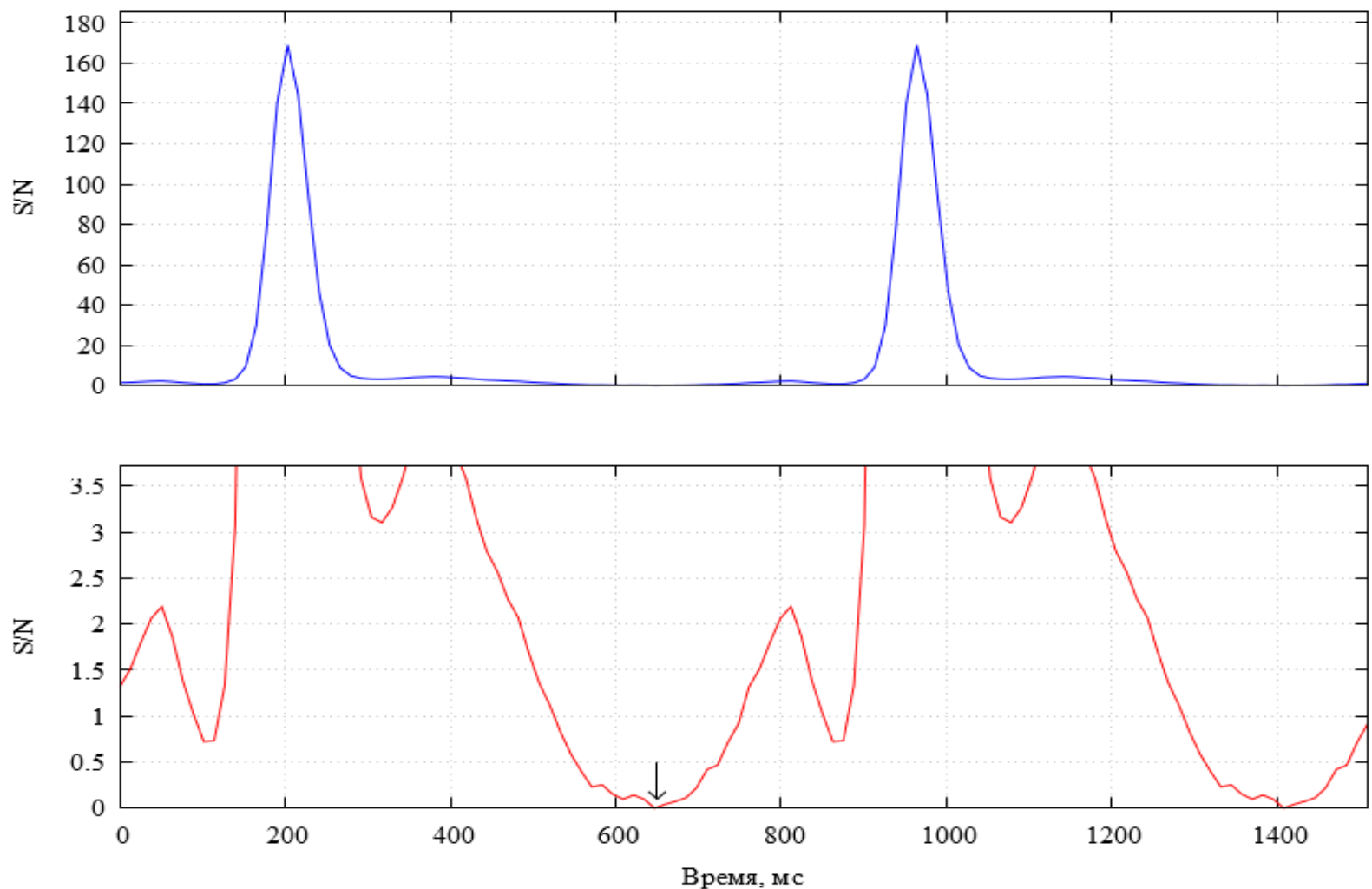
Глава IV. Поиск слабых компонент в излучении пульсаров (J1543+0929 и J2234+2114)

Пульсар J2234+2114



Накопленный за 10 лет (2014-2023, 2990 сеансов) средний профиль J2234+2114.

Пульсар J1543+0929



J1543+0929 имеет излучение практически весь период. Видно, что лишь в небольшой части среднего профиля (меньше 10% от полного периода) излучение отсутствует. Профиль является трехкомпонентным. 2 боковые компоненты: предимпульс (прекурсор) и постимпульс (посткурсор). Относительные амплитуды боковых слабых компонент составляют 0,013 и 0,025.

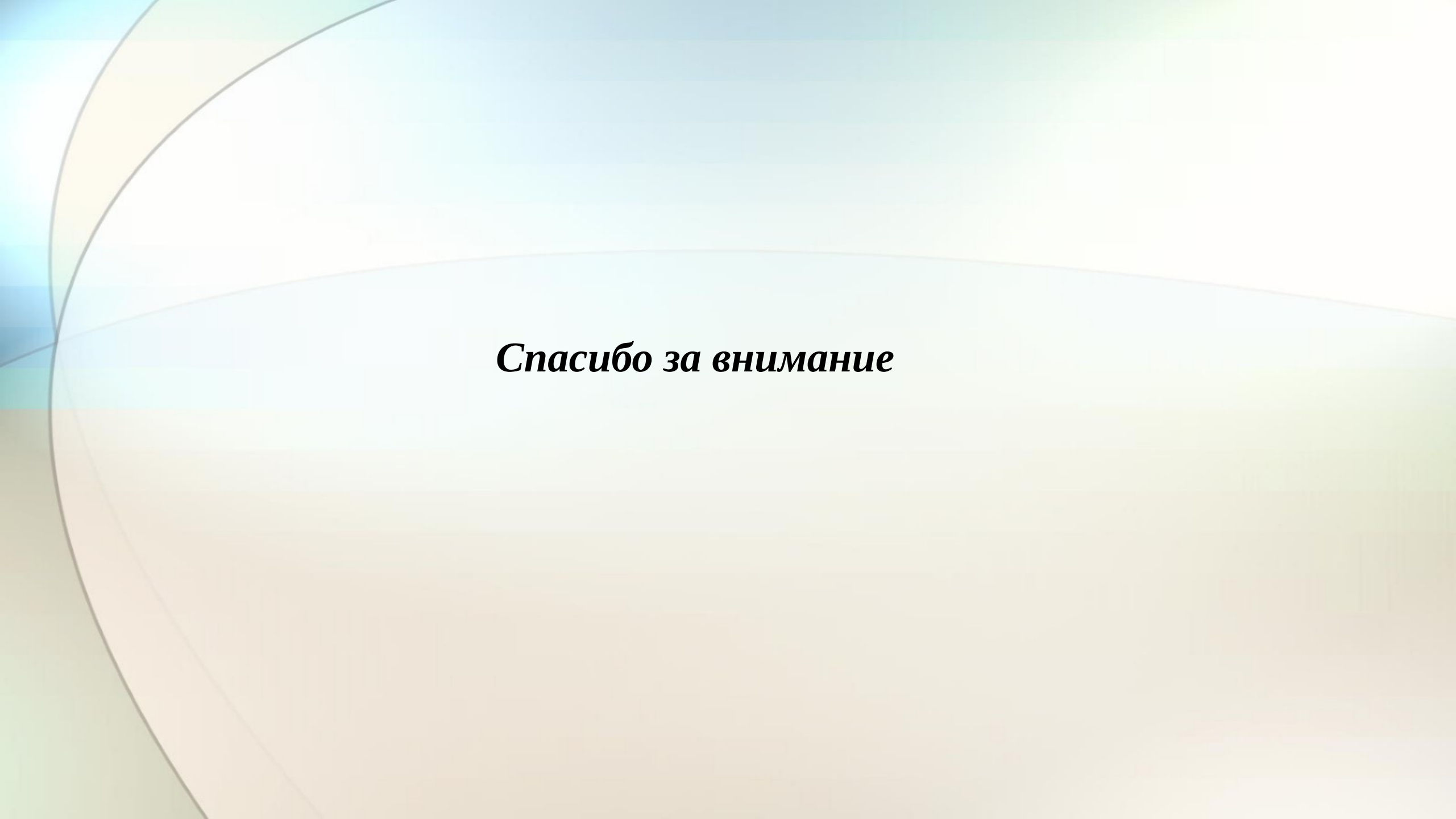
Накопленный за 10 лет средний профиль (2883 сеанса) пульсара J1543+0929 приведены с двойным периодом. Внизу - оригинальный профиль, сверху - тот же профиль с амплитудой, увеличенной в 50 раз. На верхней части рисунка хорошо виден прекурсор и посткурсор. Стрелка показывает минимум излучения, занимающий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

Основные результаты, выносимые на защиту

- 1) 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) Обнаружены вариации амплитуд главного импульса и интеримпульса радиопульсара J0826+2637 на нескольких временных масштабах (5, 180, 360 дней), вызванных, соответственно: рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, рефракцией радиоволн в межзвездной среде и наличием рассеивающего слоя на близком экране.
- 3) Измерен частотный масштаб дифракционных межзвездных мерцаний интеримпульсов радиопульсара J0953+0755, и показано, что формы спектра для интеримпульса и главного импульса хорошо коррелируют и имеют одинаковый частотный масштаб. Обнаружена модуляция излучения, связанная с рефракционными мерцаниями. Измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом.
- 4) Выявлены ранее не обнаруженные детали средних профилей радиопульсаров J1543+0929 и J2234+2114.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- 1) 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. – Т. 68. – №. 12. – С. 1191-1201. [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.]
- 2) Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Search for weak components in pulsar radiation //Astronomy Reports. – 2024. – Т. 68. – №. 12. – С. 1185-1190. [Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Поиск слабых компонентов в радиоизлучении пульсаров // Астрономический журнал. – 2024. – Т. 101. – №. 12. – С. 1078-1083.]
- 3) 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. – Т. 68. – №. 8. – С. 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) 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. – Т. 67. – №. 6. – С. 590-595. [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.]
- 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) 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. [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.]



Спасибо за внимание

Отзыв ведущей организации

Тайминг при сложении профилей не использовался. Для надежности брались профили с большим $S/N > 6$. Формирование суммарного итогового профиля за выбранный период наблюдений проводилось следующим образом:

- 1) В программе расчёта использовались эфемериды EPM2017 и библиотеки для работы с эфемеридами `libephaccess`, реализованной на языке C, Института прикладной астрономии РАН.
- 2) По межлучевому коэффициенту контролировалось состояние ионосферы, если смещение координат по склонению большое, то обработанные записи не использовались для анализа.
- 3) В полученном за каждый день среднем профиле проводился кольцевой сдвиг таким образом, чтобы главный импульс находился на расстоянии $1/4$ фазы периода от начала среднего профиля. Положение главного импульса определялось поиском глобального максимума с учётом априори известного среднего профиля пульсара с дополнительной визуальной проверкой полученных результатов.

Главный источник ошибок при формировании среднего профиля – это аддитивный белый шум (тепловой шум аппаратуры и фоновое излучение неба), который накладывается на полезный сигнал пульсара в каждом фазовом бине. Самый распространенный способ оценить уровень флуктуаций – измерить среднеквадратичное отклонение σ_{off} в той части профиля, где сигнал пульсара отсутствует:

$$\sigma_{off} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \langle I \rangle)^2}$$

С оставшимися двумя замечаниями полностью согласен, спасибо за внимательное прочтение диссертации.

Отзыв оппонента Пширкова М.С.

Отнесение пульсаров к категории соосных или ортогональных возможно только после проведения поляриметрических наблюдений, которые невозможно провести на антенне БСА, принимающей только линейно-поляризованное излучение, при этом основной статистический вывод может быть модифицирован, если основываться только на наблюдениях БСА. Однако, уже после нашей работы была опубликована похожая работа по данным FAST (*Wang P. F. et al. FAST pulsar database. I. Polarization profiles of 682 pulsars //Research in Astronomy and Astrophysics. – 2023. – Т. 23. – №. 10.*), где были поляриметрические измерения и получен тот же самый результат.

Максимальная чувствительность (для всей полосы 2,5 МГц) радиотелескопа БСА, при постоянной времени опроса 12,5мс (частота 80Гц) составляет 0,2 Ян.

Анализ профилей 96 пульсаров, полученных за 10 лет наблюдений, позволил обнаружить 12 пульсаров с интеримпульсами, причем у 9 пульсаров интеримпульсы обнаружены впервые, у 82 пульсаров новых деталей (особенностей) в суммированных средних профилях не найдено не было, при этом у двух пульсаров (J1543+0929 и J2234+2114) были обнаружены необычные детали в профилях, анализ которых и составляет главу IV.

Верная формула для стр.78: $r = V_{ef}T_{ref}/\theta_{scat} = 6,7 \cdot 10^{13}$ см.

С остальными замечаниями согласен. Спасибо Максиму Сергеевичу за тщательное прочтение диссертации.

Отзыв оппонента Зюзина Д.А.

Для J0332+5434 в Таблице II.1 верно $S/N_{\text{IP}} < 4,0$.

Так как импакт угол ~~между магнитной осью и осью вращения~~ мал, наблюдатель может видеть излучение практически весь период (*стр. 97*).

Автор диссертации не участвовал в работах по поиску транзиентов.

С остальными замечаниями согласен, спасибо оппоненту за работу.

***Спасибо оппонентам и ведущей организации за
конструктивную критику***