

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК xxx.xxx

Кудряшова Анастасия Алексеевна

**Исследование внегалактических источников в обзорах
неба на РАТАН-600**

Направление 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук

Научный руководитель:
Кандидат физико-математических наук Бурсов Николай Николаевич

Нижний Архыз — 2024

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Методика наблюдений и обработки обзоров неба на Западном секторе РАТАН-600	14
1.1 Обзоры на Западном секторе РАТАН-600	14
1.2 Антенна и радиометрический комплекс	17
1.3 Методика обработки и программное обеспечение	20
1.4 Математические методы анализа данных	27
1.4.1 Индексы переменности	27
1.4.2 Анализ методом структурной функции	28
1.4.3 Обобщённая периодограмма Ломба-Скаргла	31
1.5 Выводы Главы 1	31
Глава 2. Исследование источников в обзоре неба на склонении пульсара в Крабовидной туманности на РАТАН-600	33
2.1 Наблюдения и обработка	33
2.2 Радиоспектры	34
2.3 Поиск переменности слабых источников ($S_\nu < 100$ мЯн)	37
2.4 Поиск переменности сильных источников ($S_\nu > 100$)	39
2.5 Кросс-идентификация с оптическими каталогами	40
2.6 Радиосветимость источников	43
2.7 Выводы Главы 2	44
Глава 3. HFP блазар PKS 1614+051	46
3.1 Радиоисточники с пиком на высоких частотах (HFP)	46
3.2 Квазар PKS 1614+051	51
3.3 Наблюдения и обработка	53
3.4 Анализ кривой блеска PKS 1614+051	63
3.4.1 Оценка уровня переменности PKS 1614+051	65
3.5 Влияние мерцаний межзвездной среды на уровень обнаруженной переменности	67

3.6	Выводы главы 4	68
Глава 4. Суточная переменность радиоизлучения блазара		
	АО 0235+164	70
4.1	Блазар АО 0235+164	70
4.2	Ежедневные наблюдения блазара АО 0235+164 на РАТАН-600 . .	74
4.3	Анализ переменности кривых блеска АО 0235+164	76
4.4	Идентификация вторичных вспышек блазара АО 0235+164	79
4.5	Влияние межзвёздных мерцаний на наблюдаемый уровень переменности спектральной плотности потока излучения	83
4.6	Выводы главы 3	84
	Заключение	85
	Список литературы	87

Введение

Радиообзоры неба и дальнейшее изучение источников являются эффективным методом наблюдательной астрономии. Реализация слепых радиообзоров является трудоемкой задачей, связанной с длительными всепогодными наблюдениями и рядом методических сложностей, таких как калибровка измерений по спектральной плотности потока и обработка больших объёмов данных. Среди первых больших обзоров можно выделить Кембриджские обзоры: обзор 1959 года 3С [1] на частоте 159 МГц и обзор 1965-1967 годов, 4С на 178 МГц [2; 3]. Более поздние обзоры проведены в 60-70-х годах на австралийском телескопе в Парксе [4] на 408 и 2700 МГц, а также в 1986-1987 годах на 90-метровом параболоиде обсерватории NRAO Green Bank GB6 [5] на 4.85 ГГц. Значительный вклад в изучение радиоисточников внесли большие высокоточные обзоры неба NVSS [6] и FIRST [7], проведенные в NRAO на радиоинтерферометре VLA (Very Large Array) на 1.4 ГГц в конце прошлого века.

Среди крупных современных радиообзоров можно отметить TGSS [8], проведённый на индийском радиотелескопе метрового диапазона (GMRT - Giant Metrewave Radio Telescope) на частоте 150 МГц в 2010-2012 годах; обзор GLEAM (Galactic and Extra-Galactic All-Sky MWA Survey) [9], выполненный на 20 частотах в диапазоне 72-231 МГц австралийского телескопа MWA в 2013-2014 годах; обзор NRAO VLASS [10], который проводится с 2017 г. на 2-4 ГГц.

Как правило, целью радиообзоров является составление каталогов источников на различных частотах, получение кривых блеска радиоизлучения на разных временных масштабах для исследования механизмов и процессов, происходящих в объектах. С увеличением чувствительности современных радиотелескопов и совершенствованием методов измерений и обработки обнаруживаются популяции всё более слабых радиоисточников.

В СССР первый поисковый радиообзор был проведен в Крымской астрофизической обсерватории на радиотелескопе РТ-22 в 1969 г. на частоте 10 ГГц [11]. На радиотелескопе РАТАН-600 [12] было проведено несколько крупных обзоров неба: глубокие обзоры “Холод” в 1980-1981 годах на 3.9 ГГц [13], в результате которого был получен РС каталог радиоисточников с рекордной на тот момент чувствительностью по спектральной плотности потока 4 мЯн

и обнаружено порядка тысячи объектов, среди которых преобладали квазары и мощные радиогалактики [14–17]; Зеленчукский обзор области $0^\circ < \text{Dec} < 14^\circ$ в 1984-1990 годах на 3.9-11.2 ГГц [18]. Следующими были обзоры двухградусной околоразенитной области неба “Зенит” ($\text{R.A.} = 0^h - 24^h$, $\text{Dec} = 41^\circ.5 \pm 1^\circ$) на склонении источника 3C 84, которые проводились в течение 10 лет [19; 20]. В результате был получен RZF (RATAN-600 Zenith Field) каталог 437 радиоисточников на 3.9 ГГц с чувствительностью 2.5 мЯн [21] и были приведены оценки мощности свободно-свободного и синхротронного излучения Галактики на средних и мелких масштабах $500 < l < 1000$ [22].

Из работ Ю.Н. Парийского известно, что квазары и мощные радиогалактики преобладают среди наблюдаемых в радиоконтинууме источников со спектральной плотностью потока в сантиметровой области спектра выше нескольких мЯн [23]. Среди программ наблюдений активных ядер галактик (АЯГ) в радиодиапазоне выделяются: долговременный мониторинг, проводимый с 1980 г. на частотах 4.8-230 ГГц обсерваторией Метсахови [24; 25]; программа мониторинга блазаров с 2007 года на 15 ГГц в обсерватории в Оуэнс Вэлли [26]; трехчастотный мониторинг источников в обсерватории университета Мичигана на 4.8, 8.0 и 14.5 ГГц стартовавший в 1965 году [27]; мониторинг выборки 149 источников на радиоинтерферометре Green Bank в 1979-1996 годах на 2.3 и 8.3 ГГц [28].

Одним из эффективных способов изучения процессов, происходящих в АЯГ, являются многоволновые исследования переменности излучения на различных временных масштабах. В анализе долговременных и многочастотных кривых блеска АЯГ оцениваются: временной масштаб и уровень вариаций излучения, взаимные корреляции, временные задержки активности и изменение спектрального индекса. Оценка характерных временных масштабов вспышек и их задержек в различных частотных диапазонах даёт возможность найти взаимосвязь между пространственно разнесёнными областями переменного излучения АЯГ [29–32].

Переменность радиоизлучения АЯГ известна с 1965 года [33–35]. В 1966 году ван дер Лаан описал модель однородного сферического адиабатически расширяющегося с нерелятивистскими скоростями синхротронного радиоисточника [36]; случай релятивистского расширения был впервые рассмотрен Рисом в 1967 году [37]. Однако после обнаружения струйных выбросов (СВ) из АЯГ по-

явилось множество моделей развития радиоизлучения СВ при нестационарной аккреции вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД). Модель прецессирующего джета описывает наблюдаемую переменность спектрального распределения энергии излучения АЯГ в результате переменного Допплер-фактора из-за изменения угла ориентации релятивистского джета [38—41].

Радиотелескоп РАТАН-600 хорошо подходит для долговременного и многочастотного мониторинга, его главным преимуществом является измерение мгновенных радиоспектров космических объектов на частотах от 1 до 30 ГГц [12; 42]. Чувствительность РАТАН-600 по спектральной плотности потока на размер луча варьируется в диапазоне от 5 до 200 мЯн в зависимости от частоты на средних углах при отсутствии помех и хороших погодных условиях.¹

Регулярный многочастотный мониторинг АЯГ проводится на РАТАН-600 с середины 90-х годов прошлого века [43—46]. Кривые блеска более 1700 блазаров, наблюдаемых массово с 2004 г., представлены в интерактивном каталоге BLcat [47; 48], доступном на сайте САО РАН.² В этом каталоге на 2022 год среднее число измерений составляет 17. Блазары и их классификация заимствованы из обширного каталога блазаров Roma-BZCAT, который содержит 3561 АЯГ [49; 50]. Около 20% блазаров этого каталога имеют менее 20 измерений в радиоконтинууме за всё время наблюдений, то есть регулярные долговременные многочастотные данные имеются для ограниченного числа блазаров.

С 2017 года на Западном секторе РАТАН-600 проводятся обзоры неба на разных склонениях на частотах 2.3 и 4.7 ГГц с целью поиска быстрых радиовсплесков [51]. Каждый из проведённых обзоров длился около одного года.

В таких обзорах неба при неподвижной антенне с относительно большой диаграммой направленности можно проводить ежедневные измерения большого числа источников в течение одного года, и таким образом получать непрерывные кривые блеска с точностью в нескольких процентов для объектов с плотностью потока выше 1 Ян.

Таким образом, был проведён мониторинг 205 источников с $S_\nu > 15$ мЯн в обзоре на склонении пульсара в Крабовидной туманности и была исследована переменность радиоизлучения двух ярких блазаров АО 0235+164 и PKS 1614+051 в течение года, каждый.

¹<https://www.sao.ru/hq/Komitet/CircLet2024-R600.pdf>

²<https://www.sao.ru/blcat/>

В настоящей работе представлены результаты исследований АЯГ, в том числе блазаров, из трёх обзоров с 2018 по 2022 год.

Целью работы является изучение радиосвойств АЯГ на основе данных круглосуточных обзоров неба на Западном секторе РАТАН-600.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Проведение круглосуточных обзоров неба на штатных радиометрах на разных склонениях.
2. Разработка алгоритмов и программ обработки и калибровки измерений, полученных в обзорах в режиме неподвижной антенны, с учётом параметров диаграммы направленности и усиления радиометров.
3. Обработка больших массивов данных для каждого радиометра в условиях электромагнитных помех. Измерение спектральных плотностей потоков исследуемых источников и построение их кривых блеска.
4. Кросс-идентификация исследуемых источников с объектами радио- и оптических каталогов, компиляция радиоспектров в широком диапазоне частот, анализ спектральных свойств источников и статистика свойств выборки объектов.
5. Анализ свойств переменности радиоизлучения: временного масштаба, смещения по времени между частотами, периодичности, влияния мерцания на межзвёздной среде на наблюдаемый уровень переменности.
6. Сравнение полученных результатов с данными из опубликованных работ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе разработанной методики обработки наблюдений радиоисточников в обзорах на Западном секторе РАТАН-600 в режиме неподвижной антенны измерено 6080 плотностей потоков излучения на 4.7 ГГц с точностью 2 - 7 %.
2. В результате обработки обзора на 4.7 ГГц на склонении пульсара в Крабовидной туманности в 2018-2019 годах составлен новый каталог измерений спектральных плотностей потоков 205 радиоисточников с уровнем потока $S_{4.7} > 15$ мЯн. Для 50 объектов измерения выполнены впервые на частотах $\nu \geq 4.7$ ГГц. Для всех объектов впервые построены кривые блеска с осреднением записей за каждый месяц наблюдений;

- для 26 наиболее ярких источников с $\overline{S}_{4.7} = 250$ мЯн измерены кривые блеска с трёхдневным осреднением данных.
3. В результате анализа переменности излучения 205 радиоисточников показано, что плотность потока излучения блазара В2 1324+224 увеличилась в два раза на масштабе одного года наблюдений, у остальных объектов изменение уровня излучения было в среднем 20%. Показано, что наименьшую радиосветимость имеют галактики и объекты неопределённого типа, а наибольшую — блазары и квазары.
 4. В результате анализа суточной кривой блеска в 2019-2020 годах блазара PKS 1614+051 на 4.7 ГГц показано, что источник был слабо переменным. Измерен временной масштаб переменности радиоизлучения в системе источника $\tau \approx 25$ дней, что предполагает высокую компактность (малая доля парсека) излучающей области.
 5. В результате ежедневных измерений плотности потока блазара АО 0235+164 в 2021-2022 годах на 2.3 и 4.7 ГГц на склоне яркой вспышки были впервые обнаружены три повторные вспышки меньшей амплитуды. Их временной масштаб составил 57 дней в системе источника, что вносит ограничение на размер излучающей области $R \ll 1$ пк. Обнаружена задержка максимумов излучения этих вспышек между 2.3 и 4.7 ГГц, равная 7 дням, что соответствует расстоянию $D < 0.1$ пк между областями генерации излучения.

Научная новизна:

1. Методика обработки и калибровки континуальных измерений, представленная в настоящей работе, является новой для обзоров на Западном секторе РАТАН-600 в режиме фиксированной высоты наблюдений.
2. Составление нового каталога измерений с месячным и годовым осреднением плотностей потоков для 205 АЯГ на частоте 4.7 ГГц. Измерения для четверти источников в высокочастотной области спектра ($\nu \geq 4.7$ ГГц) выполнены впервые.
3. Для 26 наиболее ярких источников впервые измерены средние спектральные плотности потока за каждые три дня в течение года наблюдений. Впервые измерены плотности потоков радиоизлучения блазара PKS 1614+051 на 4.7 ГГц в период 2019–2020 годов и впервые обнару-

жен временной масштаб переменности радиоизлучения 25 дней в системе отсчёта источника.

4. Впервые выполнены ежедневные измерения плотностей потоков блазара АО 0235+164 на частотах 2.3 и 4.7 ГГц в период 2021–2022 годов. Впервые обнаружены три повторные вспышки на обеих частотах с временным масштабом переменности около 57 дней в системе источника.

Научная и практическая значимость Разработанный новый алгоритм обработки измерений на РАТАН-600 может использоваться в рамках новых наблюдательных программ на Западном секторе телескопа с использованием многолучевого комплекса диапазона 4.7 ГГц с высоким временным разрешением. Новые ежедневные измерения 205 радиоисточников размещены в открытых базах данных (<https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR>) и являются ценным материалом для дальнейших исследований природы излучения космических объектов. Ежедневные измерения АО 0235+164 и PKS 1614+051 могут быть использованы в дальнейшем исследовании и интерпретации механизмов переменности нетеплового излучения в блазарах, и прежде всего на коротких временных масштабах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на семинарах САО РАН и в следующих докладах на всероссийских конференциях:

1. Методика обработки обзоров на РАТАН-600 при неподвижной антенне, Всероссийская астрономическая конференция, устный доклад, 2021 год.
2. Исследование выборки ярких источников в наблюдениях на западном секторе РАТАН-600, Многоликая Вселенная: теория и наблюдения, устный доклад, 2022 год.
3. Обзор неба и исследование радиоисточников обнаруженных на склонении ЗС 84 в наблюдениях 2011-2012 гг, Многоликая Вселенная: теория и наблюдения, постерный доклад, 2022 год.
4. Свойства источников выборки, наблюдаемых в обзорах неба на РАТАН-600, Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, всероссийская, постерный доклад, 2022 год.

5. Методика обработки обзора неба на склонении Крабовидной туманности на РАТАН-600, Современные инструменты и методы в астрономии, устный доклад, 2023 год.
6. Радиоисточники обзора на склонении пульсара в Крабовидной туманности ($\delta = +22^\circ$), Конкурс-конференция САО РАН, 2024, устный доклад.
7. Исследование суточной переменности радиоизлучения блазаров в обзорах на РАТАН-600, Всероссийская научная конференция «Современная наблюдательная космология», устный доклад, 2025 год.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в обработке измерений и интерпретации полученных результатов, отладке новой методики обработки. Автор принимал в соавторстве участие в: расчёте радиосветимости и радиогромкости источников в работе [8]; в оценке масштабов переменности в работе [5] в оценке уровня и масштабов переменности радиоизлучения блазаров АО 0235+164 и PKS 1614+051 с учетом межзвездного мерцания в работах [7] и [9]. В работе [6] автором осуществлен сбор всех доступных радиоизмерений источников в базе данных CATS; проведён поиск доступной информации по радиоисточникам в базах данных SIMBAD, NED, Roma-BZCAT; выполнил кросс-идентификацию источников с источниками оптическими каталогами в SDSS (DR16), Gaia (DR3) Extragalactic, Pan-STARRS и с источниками инфракрасного каталога 2MASS; рассчитал радиосветимость. Автор по всем задачам работал с литературными данными с последующим обзором затронутых проблем в работе. Во всех работах принимал участие в обсуждении полученных результатов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме. Формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Описан личный вклад автора в проведённые исследования.

Первая глава посвящена методике обработки данных обзоров на Западном секторе РАТАН-600. Основные характеристики и особенности обзоров с

неподвижной антенной описаны в разделе 1.1. Параметры антенны и приёмников, используемых в наблюдениях описаны в разделе 1.2. Математические методы обработки данных, используемые в диссертации описаны в разделе 1.4.

Вторая глава Посвящена исследованию выборки 205 наиболее ярких источников с $S/N > 50$ обзора на склонении пульсара в Крабовидной туманности. Обзор проводился в 2018-2019 гг.

В результате применения методики, описанной в Главе 1, удалось получить и исследовать выборку из 205 наиболее ярких источников. Для них получены средние значения спектральной плотности потока за каждый месяц наблюдений. При этом, для 26 источников данной выборки были получены кривые блеска за каждый день наблюдений. Кривые блеска были изучены на наличие возможной переменности.

В результате лишь один источник - В2 1324+22 показал рост плотности потока за год в два раза.

У остальных источников уровень переменности $\sim 10\%$.

В разделе 2.1 дано краткое описание обзора на склонении пульсара в Крабовидной туманности. В разделе 2.2 даны спектральные характеристики полученной выборки радиисточников. Для подвыборки наиболее слабых источников с $<S_{4.7}<$

Третья глава посвящена исследованию яркого экстремально компактным блазара [52–54] АО 0235+164 с красным смещением $z = 0.94$ [55]. В разделе 4.1 дано описание объекта, особенностей его угловой структуры и излучения. В разделе 4.2 описаны наблюдения АО 0235+164, полученные в рамках настоящего диссертационного исследования. В разделе 4.3 описано исследование переменности плотности потока излучения во время наблюдений. В разделе 4.4 описывается возможная связь между вспышками и изменениями в угловой структуре в литературных РСДБ-картах. В разделе 4.5 приводится оценка возможного вклада мерцаний на межзвёздной среде на наблюдаемый уровень переменности.

Четвёртая глава посвящена исследованию далёкого НФР квазара PKS 1614+051 на $z = 3.21$ [56]. В разделе 3.1 описано современное представление о НФР- радиисточниках. В разделе 3.2 описан объект исследования PKS 1614+051. В разделе 3.3 описаны ежедневные наблюдения PKS 1614+051, полученные в рамках настоящего исследования. В разделе 3.4 описаны свой-

ства переменности объекта в ежедневных наблюдениях. В разделе 3.4 приводится оценка возможного влияния вклада мерцаний на межзвёздной среде на наблюдаемый уровень переменности.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Проведены обзоры на Западном секторе РАТАН-600. Для полученных данных разработаны алгоритмы, программное обеспечение и обработаны данные непрерывных наблюдений с неподвижной антенной на различных склонениях.
2. Обзор на склонении Крабовидной туманности был проведен на 4.7 ГГц в 2018-2019 годах. В результате обработки был получен список наиболее ярких 205 радиоисточников ($S/N > 50$). Все источники отождествлены с радиоданными базы данных CATS и построены спектры, для четверти из которых впервые в высокочастотной области спектра ($\nu \geq 4.7$ ГГц). Методом кросс-идентификации 85% источников отождествлены с источниками оптических каталогов SDSS (DR16), Gaia (DR3), Pan-STARRS, 2MASS и баз данных SIMBAD, NED, Roma-BZCAT, что дало информацию о морфологических типах этих объектов. Обнаруженные источники в основном относятся к квазарам и галактикам различных типов. Также для 205 источников рассчитаны индексы переменности с осреднением 30-90 дней, а для наиболее сильных источников ($S_\nu > 15$ мЯн) строились структурные и автокорреляционные функции и получены кривые блеска с трех-суточным накоплением. Увеличение плотности потока излучения в два раза обнаружена у блазара B2 1324+22. У остальных переменность в среднем менее 20%.
3. Для далёкого квазара с пиком в радиоспектре на высокой частоте (HFP) PKS 1614+051 на $z = 3.21$ получены кривые блеска на 2.3 и 4.7 ГГц за период 6.2019–05.2020. Впервые было обнаружен временной масштаб переменности радиоизлучения на уровне 3% с периодом 25 дней в системе отсчёта источника.
4. Получены кривые блеска на 2.3 и 4.7 ГГц и исследовано радиоизлучение блазара АО 0235+164 в период времени 2021-2022 гг. со средней ошибкой измерений 5 и 3 %, соответственно. Впервые обнаружены вторичные вспышки на масштабах времени 110 дней со средней периодич-

ностью около 100 дней, что следует из анализа кривых блеска наблюдений этого источника на GBI за 1983-1994 годы где подобные масштабы не обнаружены. Эволюция спектрального индекса $\alpha_{2.3-4.7}$ в течение года изменялась от +0.20 в относительно спокойном состоянии до +0.75 во время вспышек.

Полный объём диссертации составляет 107 страниц с 44 рисунками и 11 таблицами. Список литературы содержит 172 наименования.

Глава 1. Методика наблюдений и обработки обзоров неба на Западном секторе РАТАН-600

1.1 Обзоры на Западном секторе РАТАН-600

Обзоры неба на Западном секторе ($A = 270^\circ$) радиотелескопа РАТАН-600 при неподвижной антенне проводятся с 2017 г. и по настоящее время. В течение каждого года наблюдений неподвижная антенна сфокусирована на заданную высоту в каждом отдельном обзоре. Как правило обзоры проводятся на склонении какого-нибудь калибровочного или исследуемого источника. Параметры проведённых обзоров представлены в Таблице 1. Наблюдения ведутся круглосуточно, но при этом каждый час по прямому восхождению записывается в отдельный файл для упрощения дальнейшей работы с данными. В результате одного наблюдения формируются часовые записи каждого канала четырёхканального радиометра в режиме быстрой радиометрии. Так же формируются записи других радиометров (2.3 ГГц), расположенных вдоль фокальной линии.

РАТАН-600 является пассажным телескопом, в наблюдениях на котором измеряется антенная температура в зависимости от звёздного времени при прохождении участка неба через неподвижную диаграмму направленности (ДН) телескопа за счёт вращения Земли вокруг своей оси. Наблюдения на Западном секторе проводятся в направлении на восток, где источники являются восходящими. Существенной особенностью такого режима наблюдений является прохождение источников каждого обзора через ДН под разными углами относительно её центрального сечения в зависимости от склонения. Это влияет на форму и размер сечения ДН при ее свертке с проходящим источником. Параллактический угол q , угол между суточным кругом вращения источника и горизонтальной осью ДН, под которым источник проходит через ДН, определяется по формуле:

$$\sin q = \cos \varphi \cdot \sin A / \cos \delta, \quad (1.1)$$

где широта наблюдения $\varphi = 43.^\circ 83$, азимут наблюдения $A = 270^\circ$, δ - склонение источника.

Таблица 1 — Обзоры неба на Западном секторе РАТАН-600

Кол. 1 – источник, на высоте которого проводится обзор; кол. 2-3 –

координаты источника на эпоху 2000.0, кол. 4 – высота обзора,

H ($Az = 270^\circ$), кол. 5 – период, в течение которого проводился обзор, кол. 6 – число радиометров в обзоре.

Обзор (источник)	R.A. <i>hh mm ss</i>	Dec <i>° ' "</i>	H <i>° ' "</i>	Период dd/mm/yy	радио- метры
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
3C 48	01:37:41.3	33:09:35.1	52:21:07	30/08/17 – 28/05/18	1,2,3
Crab Nebula	05:34:32.0	22:00:52.0	32:48:47	28/05/18 – 30/05/19	3
SS 433	19:11:49.6	04:58:56.8	07:23:32	30/05/19 – 08/06/20	3,4,5
GRS 1915+105	19:15:11.6	10:56:44.9	16:01:55	09/06/20 – 26/05/21	5
3C 138	05:21:09.9	16:38:22.1	24:29:44	28/05/21 – 08/06/22	5
1347+12	13:47:33.4	12:17:24.1	17:47:49	15/07/22 – 01/06/23	5
1934+22	19:34:55.6	21:53:40.3	32:41:18	28/06/23 – 19/06/24	6
2253+161	22:53:57.8	16:08:53.6	23:55:01	02/07/24 – continue	6

Расчёт скорости (мм/с) движения фокального пятна для Западного сектора основан на формуле скорости для Северного сектора¹ с учётом параллактического угла q :

$$\mathbf{v} = \frac{21.23 \cdot \cos \delta}{1 + \cos H} \cdot \cos q \quad (1.2)$$

$$\sin q = \cos \varphi \sin A / \cos \delta \quad (1.3)$$

где азимут $A = 270^\circ$, $\varphi = 43^\circ 49' 53''$ - географическая широта РАТАН-600. Тогда,

$$q = \arcsin(-\cos 43^\circ.83 / \cos \delta) \quad (1.4)$$

Диаграмма РАТАН-600, несмотря на свою сложность и зависимость от высоты обзора, подробно изучена, в том числе и для Западного сектора [57]. Знание формы ДН позволяет осуществлять более точную обработку данных с разделением внеосевых источников проходящих через входные рупора радиометров. Рассчитанные значения угла q и расположение радиометров во время проведения обзоров представлены в Таблице 2.

¹https://www.sao.ru/hq/lran/ratan/ratan_english.html

Таблица 2 — Особенности прохождения источников через ДН.

1 – источник, на высоте которого проводится обзор; 2 – параллактический угол q ; 3 – скорость движения фокального пятна; 4 – расстояние между положением фокуса и входных рупоров радиометров, 5 – азимутальное расстояние между положением фокуса и входных рупоров.

Обзор (источник)	q degree	V mm/s	ΔX mm	ΔAz arcmin
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3C 48	-59.5	5.6	-92, 0, +92	-2.08, 0, +2.08
Crab Nebula	-51.1	6.7	-92, 0, +92	-2.15, 0, +2.15
SS433	-46.4	7.3	-138, -46, +46, +138	-3.25, -1.08, +1.08, +3.25
GRS 1915+105	-47.3	7.2	-138, -46, +46, +138	-3.25, -1.08, +1.08, +3.25
3C 138	-48.8	7.0	-138, -46, +46, +138	-3.25, -1.08, +1.08, +3.25
1347+12	-47.6	7.2	-138, -46, +46, +138	-3.25, -1.08, +1.08, +3.25
1934+22	-51.0	6.7	-138, -46, +46, +138	-3.25, -1.08, +1.08, +3.25
2253+161	-48.7	7.0	-138, -46, +46, +138	-3.25, -1.08, +1.08, +3.25

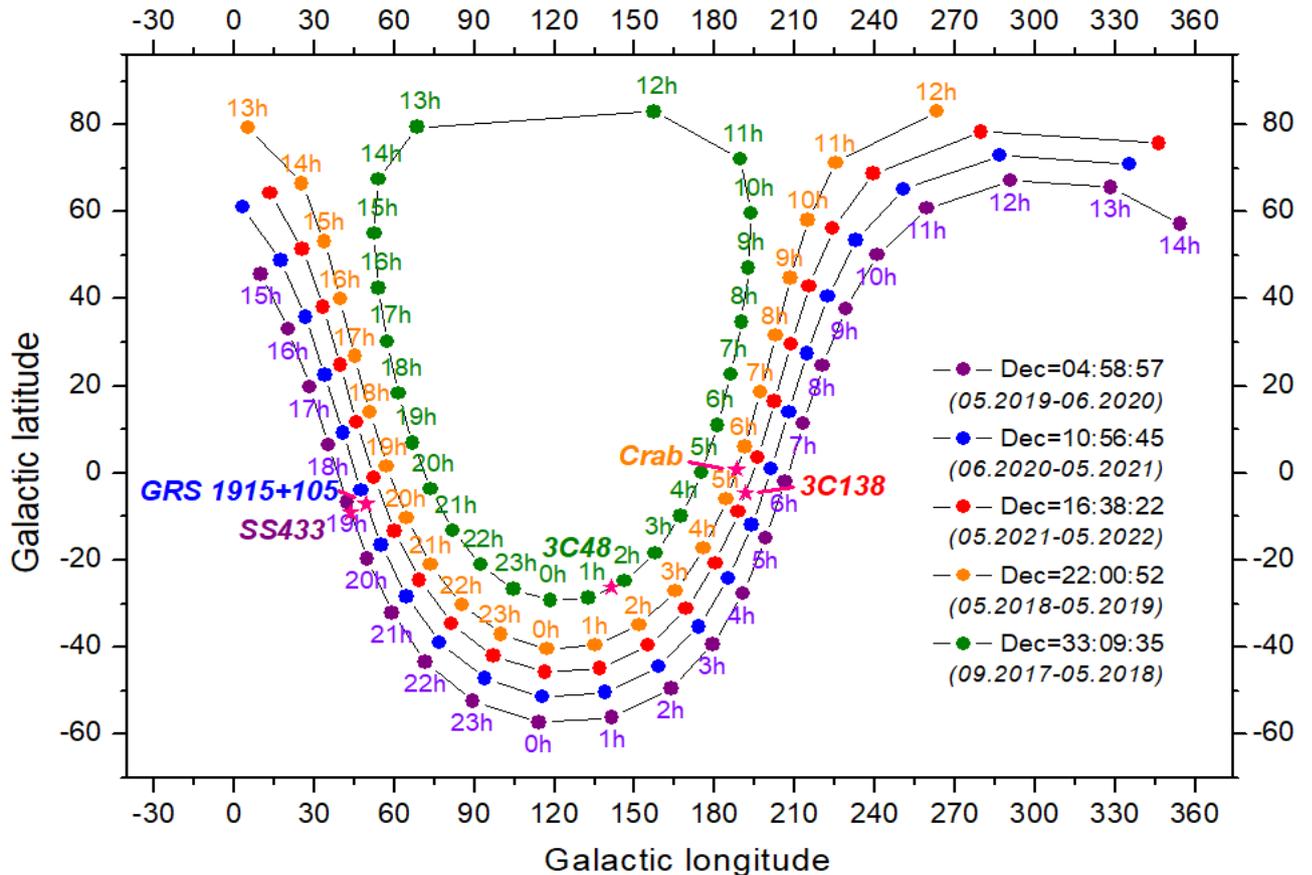


Рисунок 1.1 — Обзоры на Западном секторе РАТАН-600в галактических координатах)

На Рис. 1.1 показана область проведения обзоров на Западном секторе РАТАН-600 в галактических координатах. В диссертационной работе представлены результаты по трем обзорам: на склонении пульсара в Крабовидной туманности ($+22^\circ$), SS 433 ($+5^\circ$) и 3C 138 ($+16^\circ$).

1.2 Антенна и радиометрический комплекс

Во время проведения всех обзоров антенна Западного сектора находилась в неподвижном состоянии. Перед каждым годовым циклом наблюдений антенна перестраивалась и юстировалась на высоту соответствующего обзора. Источники через ДН проходили под параллактическим углом q , как было показано выше, с выносом ΔH относительно центра, где $\Delta H = H_0 - H_{\text{src}}$, а H_0 и H_{src} - высота обзора и высота источника.

На изображениях ДН каждого входного рупора радиометра, Рис.1.2. Изображения построены с учетом рассчитанных аббераций вынесенных рупоров. При расчете были учтены особенности антенной системы радиотелескопа: вторичное зеркало увеличенных размеров, асимметричное облучение главного зеркала, а также расположение первичных облучателей (рупоров) вдоль фокальной линии вторичного зеркала [57; 58].

На Рис. 1.3 (*слева*) представлены расчетные нормированные профили вертикальной ДН антенны в азимуте $A = 270^\circ$ при проведении обзоров на разных склонениях и уширение профилей источников по уровню половинной мощности HPBW (Half-Power Beamwidth) при их прохождении через ДН в зависимости от разных смещений (выноса) по высоте от центра диаграммы, в угловых минутах (*справа*) [57].

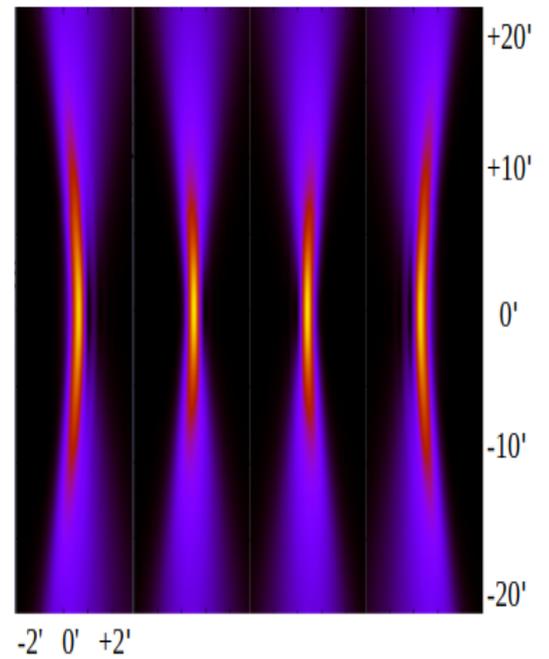
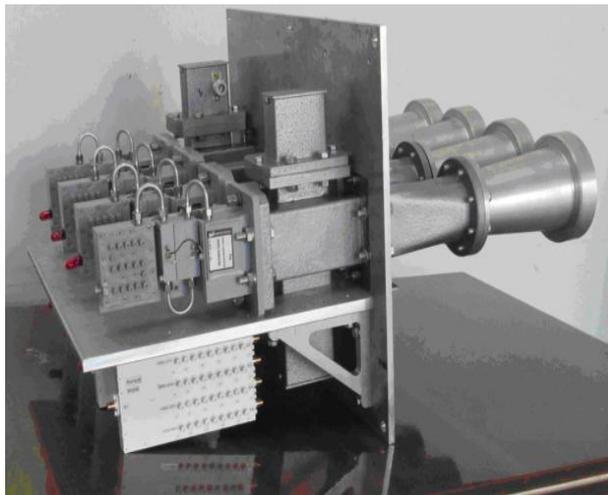


Рисунок 1.2 — Комплекс радиометров на 4.7 ГГц, установленный на вторичном зеркале «Облучатель №5» (слева); расчетные ДН для трех входных рупоров радиометров с aberrациями из-за поперечных выносов ($\pm 3'$) вдоль фокальной линии на склонении пульсара в Крабовидной туманности (справа)

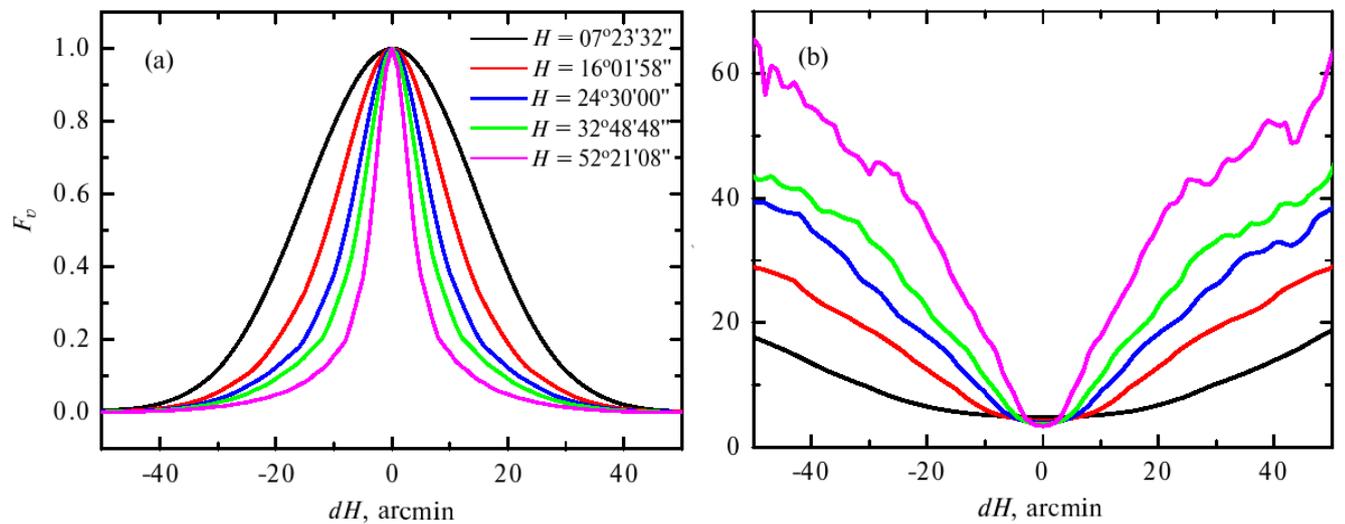


Рисунок 1.3 — Слева: вертикальные нормированные ДН по мощности, F_v ; Справа: полуширины ДН, HPBW, в различных сечениях в зависимости от выноса по ΔH , рассчитанные при наблюдениях на Западном секторе для различных высот источников, на которые была сфокусирована антенна.

Заимствовано из работы [57]

Для наблюдений на склонении пульсара в Крабовидной туманности площадь обзора с яркими 205 источниками составила: $360^\circ \cdot \cos(22^\circ) \cdot 0.45^\circ \approx 150^\circ$, их плотность составляет $205/24h < 10$ источников на час или $205/180^\circ \sim 1$ источник на кв. градус, что незначительно для эффекта путаницы (confusion). Тем не менее, случаи блендирования (пересечения) имели место и такие источники не рассматривались.

Для проведения наблюдений в континууме на РАТАН-600 использовалась система сбора данных и управления ER-DAS, которая описана в работе [59]. Это измерительная система, предназначенная для оцифровки и обработки сигналов радиометров и передачи результата по сетям Ethernet. Система ER-DAS обладает низким уровнем собственных шумов и отсутствием шума вида $1/f$. Тип радиометра - радиометр полной мощности с широкой полосой приема и с низким коэффициентом шума усилителя. На масштабах времени до 100 секунд чувствительность такого радиометра остается выше, чем у модуляционного [60].

Таблица 3 — Параметры радиометров приёмно-измерительного комплекса «Облучатель №5» по состоянию на 2025 г.

λ см	f_0 ГГц	Δf МГц	ΔT мК/сек	ΔS мЯн/сек	T_n МШУ К	T_a К	T_c К	Тип радиометра	N
2.1	14.4	2000	3.5	10	24-32	22	60	ПА	1
6.4	4.7	600(150x4)	3.5	10	24-32	22	60	ПА	4
13.2	2.3	80	12	80	35	25	95	ПМ	1

В Таблице 3 представлены основные характеристики радиометров, на которых проводились наблюдения. Приведены следующие обозначения: λ – длина волны наблюдений, f_0 – центральная частота наблюдений, Δf – полоса принимаемых частот, ΔT – чувствительность при постоянной времени 1 секунда, ΔS – чувствительность по плотности потока, за 1 секунду, T_n МШУ – шумовая температура малошумящего усилителя, T_a – шумовая температура антенны на средних углах, T_c – шумовая температура системы радиотелескоп-радиометр, ПМ – радиометр полной мощности, N – число радиометров.

В таблице представлены параметры радиометров с центральной частотой 2.3 и 14.4 ГГц, установленных позже.

1.3 Методика обработки и программное обеспечение

Для обработки и анализа больших объемов данных полученных в обзорах, было разработана методика и программное обеспечение с использованием модулей штатного пакета FADPS [61], системных утилит OS Linux – использовался командный интерпретатор в системе GNU/Linux bash (Bourne again shell) – скриптовый язык программирования. Были также разработаны программы, которые позволили создать потоковую обработку данных.

Методика обработки обзоров и анализа прохождений источников с выносами была изложена ранее в работе [62]. Методика, учитывающая прохождение источников в азимуте 270° под разными параллактическими углами через ДН при неподвижной антенне, описана в работе [63] и в настоящей работе.

На первом этапе обработки записи сильно искаженные атмосферой и нештатной работой аппаратуры фильтровались по дисперсии. Пригодные к обработке записи в четырех каналах каждого радиометра сжимались с 0.49 мсек до 0.1 сек и осреднялись по коэффициентам амплитудной связи между ними. После этого, осреднение записей по каждому часу наблюдений в течение года наблюдений проводилось с использованием непараметрических оценок по Ходжесу-Лемана[64]. Это робастный способ осреднения представляет собой некий аналог усечения выборок, где отсеиваются до 25% ранжированных элементов выборки в крыльях и при достаточном числе оставшихся элементов (>30) имеют распределение близкое к нормальному.

Осреднение записей проводилось от нескольких суток, до месяцев, а также до года по следующей формуле: все файлы наблюдений каждого часа разбивались на две равноточные по качеству выборки, которые затем осреднялись. Тогда полусумма выборок

$$((S_1 + N_1) + (S_2 + N_2))/2 = \bar{S}_{1+2} + \bar{N}_{1+2}/\sqrt{2}, \quad (1.5)$$

при равенстве сигнала (S) и, в основном, независимости шумов в обеих выборках, а в полуразности

$$((S_1 + N_1) - (S_2 + N_2))/2 = \bar{N}_{1+2}/\sqrt{2} \quad (1.6)$$

То есть, в результате в полусумму входит сигнал и шум, а в полуразность в основном шум. Относительно уровня шума и определялся уровень сигнала от источников. Выборка источников на осредненных записях формировалась по критерию сигнал/шум. Так как среднее значение величины шумовой составляющей порядка 0.12 мК, то в выборку ярких источников были отобраны источники с $Ta > 6$ мК или с $S/N > 50$. Обнаружение и отождествление ярких объектов на средних записях проводилась по координатам источников опорного NVSS-каталога с помощью базы астрофизических каталогов CATS [65]. Расчётное положение источников вычислялись по программам эфемеридного обеспечения РАТАН-600 [66].

Точная привязка с последующей коррекцией записей проводилась по выборке источников: наиболее ярких для привязки по времени и со стабильным излучением для привязки по амплитуде. Привязка усиления радиометров из-за изменения температуры окружающей среды проводилась по кривым блеска Крабовидной туманности. Определение характеристик источников — видимого положения, амплитуды и полуширины, определяющей размер, проводилось методом гаусс-анализа. На Рис. 1.4 приведены сканы источника NVSS 114325+220656, где слева вверху изображены записи наблюдений источника; справа вверху — записи после фильтрации помех за несколько месяцев наблюдений (среднее за каждые 10 дней); справа внизу — после коррекции по эфемеридам, привязке по времени и амплитуде, а также за изменение усиления радиометров; слева внизу — вид источника после усреднения записей за год наблюдений.

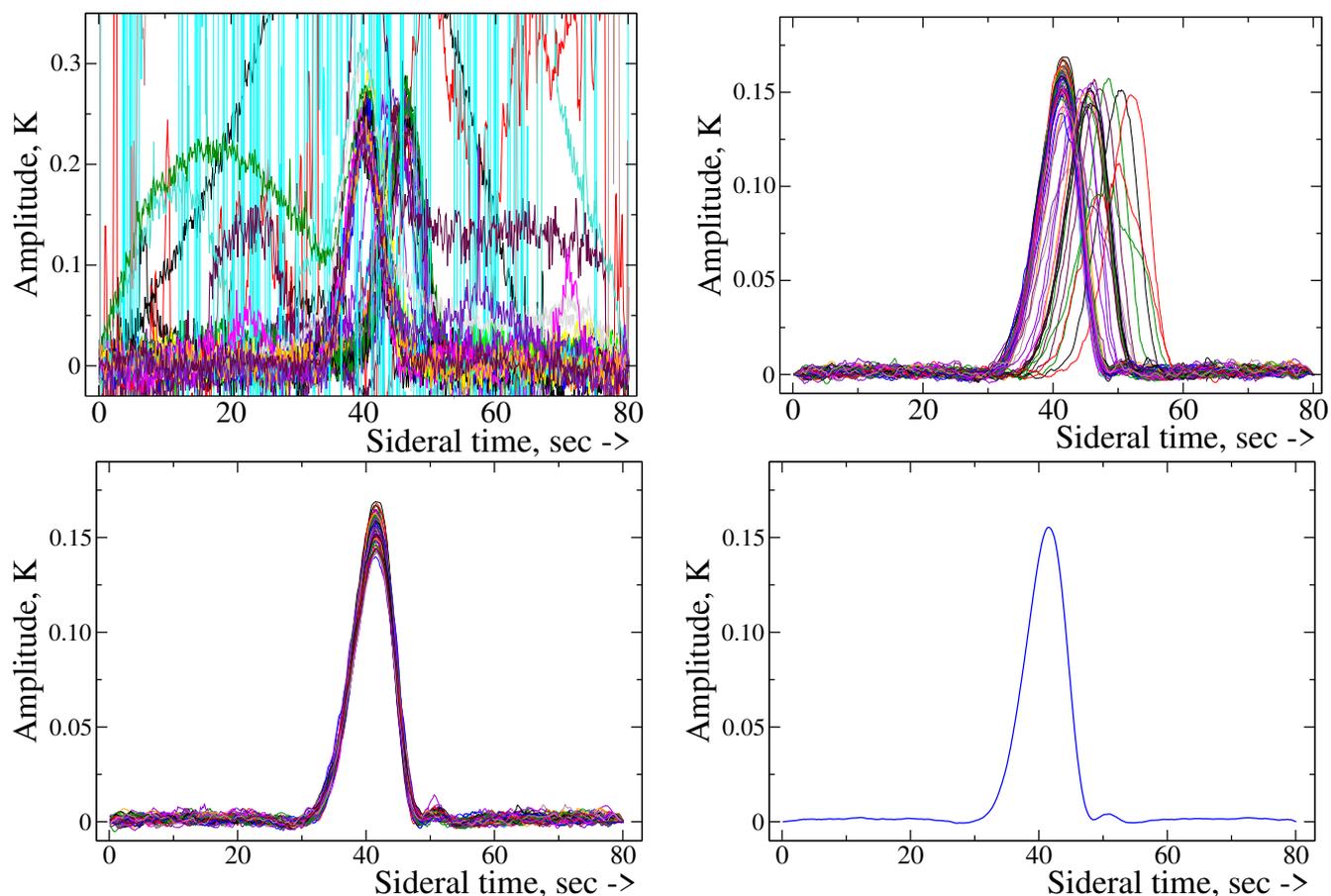


Рисунок 1.4 — Источник NVSS 114325+220656: *слева сверху* — первичные записи наблюдений источника; *справа сверху* — записи после фильтрации помех и атмосферных искажений; *слева внизу* — после коррекции по эфемеридам, привязке по времени и амплитуде, а также за изменение усиления радиометров; *справа внизу* — вид источника после осреднения

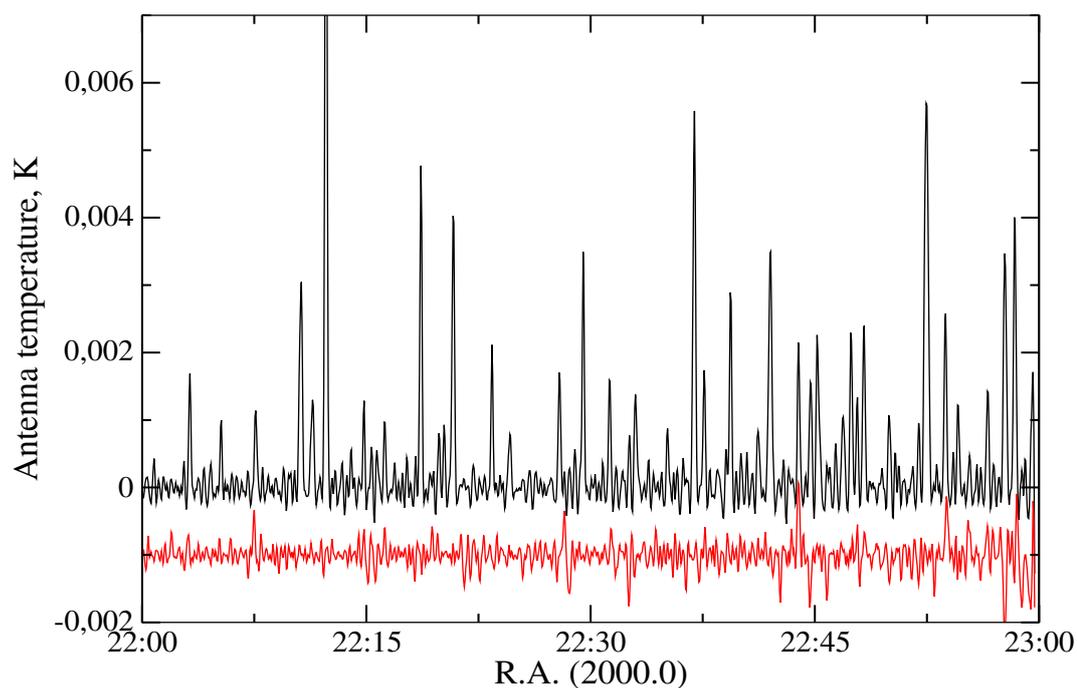


Рисунок 1.5 — Осреднение записей: пример накопления сигнала для полусуммы (чёрным) и полу-разности (красным) записей для $R.A. = 22h$

При осреднении данных проводилось почасовое разбиение записей на две равные по дисперсии группы, с дальнейшей обработкой, как это подробно было расписано выше. Таким образом, на осредненных часовых записях оцениваются T_a источников относительно записей, содержащих только шум. Это показано на Рис. 1.5, где видно, что хорошо выделяются источники с $T_a = 1-2$ мК.

В обработке наблюдений на Западном секторе есть свои сложности, которые необходимо учитывать.

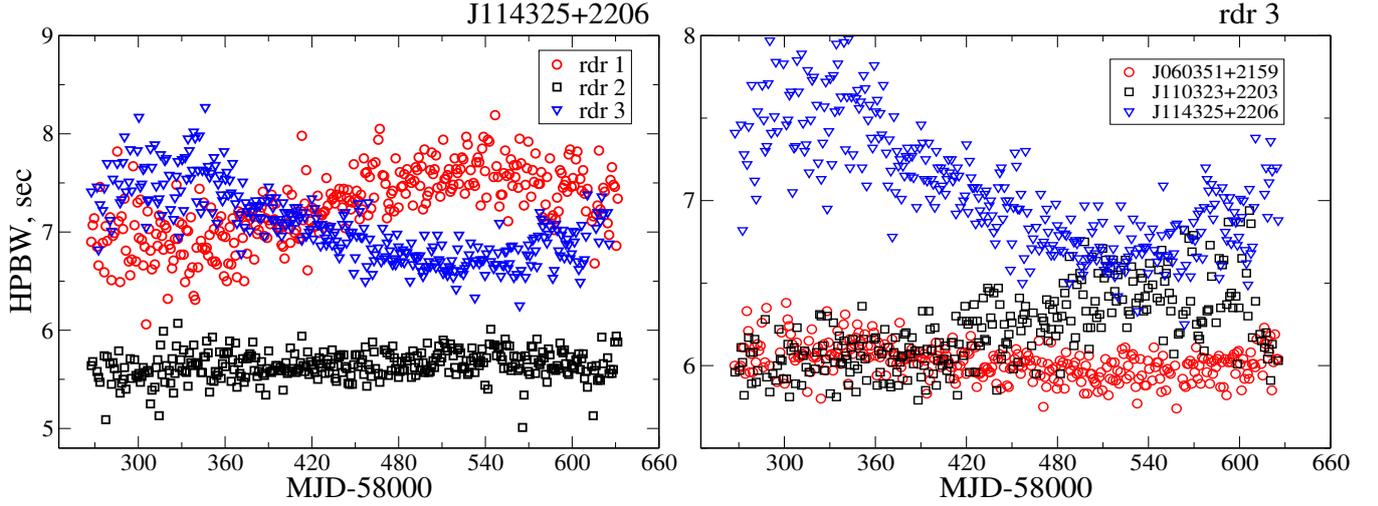


Рисунок 1.6 — Изменение полуширины источников (HPBW) в течение года: (слева) J114325+220656, (справа) три источника с разными выносами по высоте ΔH

Из-за прецессии положение источников менялось в течение года их наблюдений. Это видно на рисунках с изменением HPBW источников: симметрично расположенного источника NVSS J114325+220656 относительно центрального рупора (слева) помеченного черным цветом и для трех источников с разными выносами (справа), Рис. 1.6. Однако интеграл под кривой прохождения источников сохранялся в течение всего времени наблюдений и это позволяло корректировать T_a источников. При этом, чем больше угловое расстояние источника от центра, тем больше его размер по уровню половинной мощности и меньше уровень сигнала при сохраняющемся интеграле под кривой прохождения источника через ДН $Int = \sum(T_a(i) \times \Delta t)$, как показано на Рис. 1.3. На Рис. 1.7(слева) видно, что существует заметное отклонение измеренного положения источников от расчетного (О-С), в зависимости от часового угла (до 6 секунд времени). Для обнаружения источников было необходимо учитывать эту зависимость. Распределение источников по ΔH приведено на Рис. 1.7 (справа),

где можно проследить падение числа источников с выносом от центра ДН. Это связано с падением чувствительности вертикальной ДН из-за ограниченного размера антенны Западного сектора.

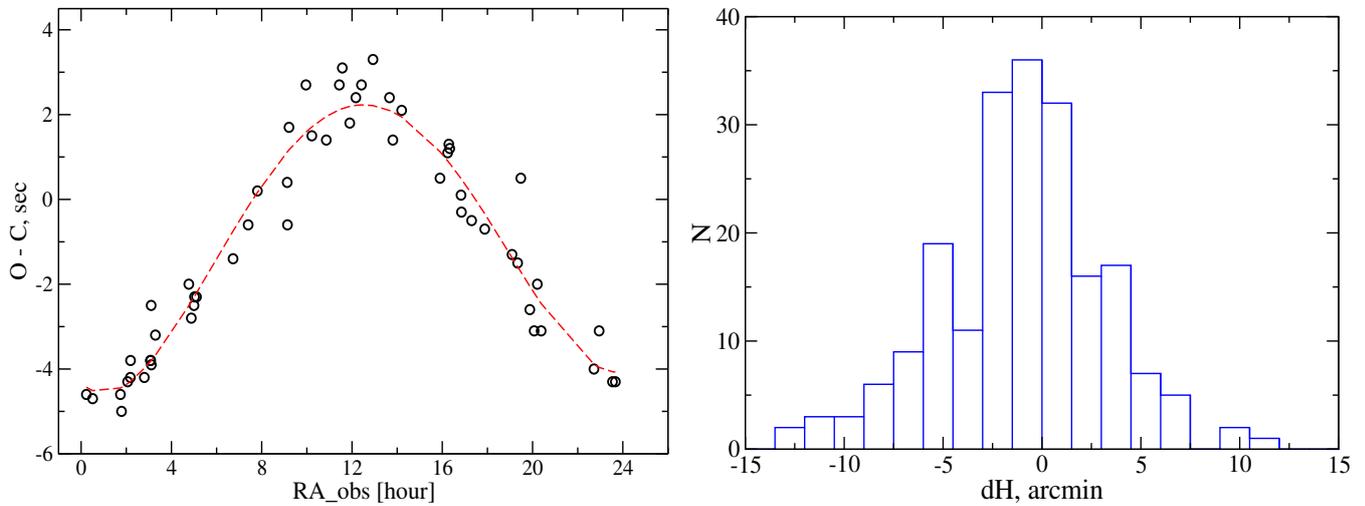


Рисунок 1.7 — Осреднение записей: (*слева*) — смещение положения источников вследствие прецессии в зависимости от часового угла; (*справа*) — гистограмма распределения источников в зависимости от выноса относительно центра ДН

Определение плотности потоков осуществлялось с помощью выборки наиболее ярких источников обзора ($S_{4.7} > 15$ мЯн) со степенным спектром и постоянным излучением. Значения плотности потока определялись из аппроксимации радиоспектров этих источников на частоте 4.7 ГГц.

По ним строились калибровочные кривые: отношение спектральной плотности потока каждого источника на частоте обзора ($S_{4.7}$) к его антенной температуре T_a в зависимости от выноса источника от центра ДН рупора каждого радиометра, $S_{4.7}/T_a \sim f(\Delta H)$. На Рис. 1.8 показаны калибровочные кривые для трех радиометров на 4.7 ГГц.

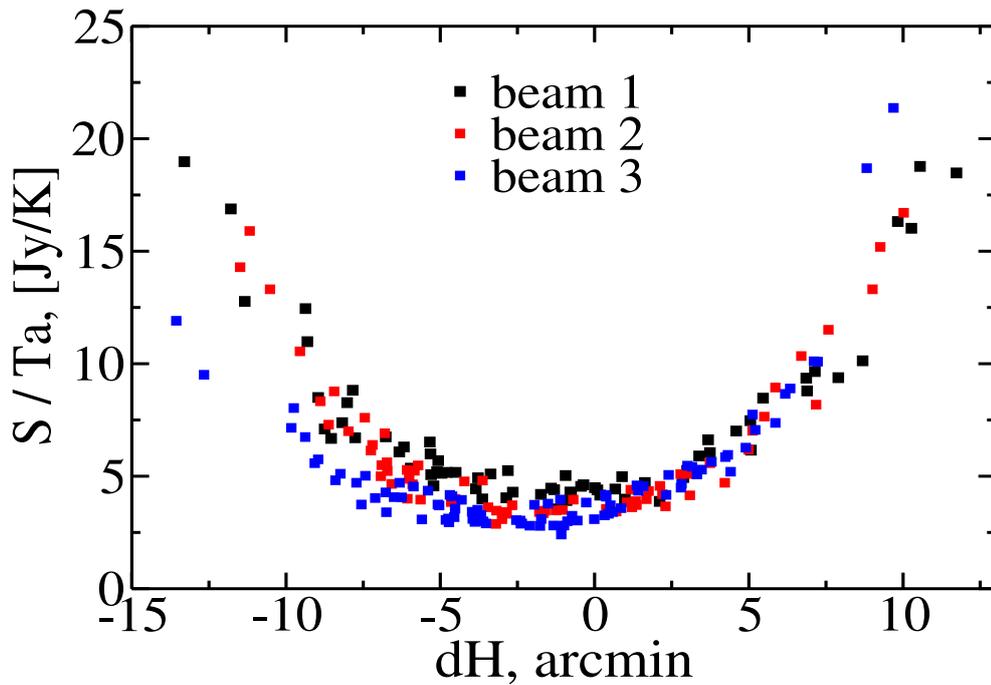


Рисунок 1.8 — Калибровочные кривые по плотности потока для трех радиометров на 4.7 ГГц ($S_{4.7}/T_a \sim f(\Delta H)$), полученные по выборке радиоисточников с постоянным излучением

Управляющая программа, weak.com, была предназначена для подбора входных параметров каждого обзора и запуска weak.src. Также по полученным табличным данным в результате гаусс-анализа, таких как видимое положение на день наблюдений (α_{vis}), отклонение от расчетного положения (o-c), антенная температура источника (T_a), полуширина вписанной гауссианы (HPBW), интегральное значение ($T_a \cdot \text{HPBW}$), дата и приведенный юлианский день наблюдений (MJD) проводились статистические оценки параметров обрабатываемых источников.

В Таблице 1.3 приведен пример обработки источника NVSS J060351+215937 за июнь 2018г., в которую заносятся основные параметры обрабатываемого источника за каждый день наблюдений: видимое звездное время, амплитуда источника, его полуширина, ошибки и даты измерений. В конце таблицы приведены статистические данные по всем параметрам. Это позволяет сразу строить кривые блеска по основным параметрам, в том числе нормированным к средним значениям и оценивать качество проведенных наблюдений.

Таблица 4 — Пример обработки источника NVSS J060351+215937 за июнь 2018г. 1 – измеренное звёздное время прохождения источника через ДН; 2 – разница между расчётным и измеренным звёздным временем прохождения источника через ДН; 3 – измеренная антенная температура, 4 – относительная ошибка измерения антенной температуры; 5 – размах помех на источнике при вычитании вписанной гауссианы; 6 – полуширина вписанной в профиль гауссианы; 7 – интеграл вписанной гауссианы; 8 – дата наблюдений, 9 – средняя модифицированная юлианская дата наблюдений.

s.time (gss) [hh mm ss]	o-c [sec]	Ta [mk]	err [%]	mx+mn [mk]	HW [sec]	Ta*HW [mk*sec]	date [dd mm yy]	MJD [24+]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
01 44 12.03	0.71	187.8	2.6	-4.2	8.72	1.7444	03 06 18	58273
01 44 12.06	0.73	186.5	2.3	-0.3	9.12	1.8103	04 06 18	58274
01 44 12.30	0.97	196.6	2.5	-0.3	8.65	1.8113	05 06 18	58275
01 44 12.00	0.67	201.9	2.7	1.4	8.52	1.8307	06 06 18	58276
01 44 12.38	1.05	197.0	2.2	-6.0	8.68	1.8204	07 06 18	58277
01 44 11.61	0.28	182.9	2.7	-0.6	9.45	1.8393	08 06 18	58278
01 44 12.04	0.71	195.7	2.9	-5.5	8.80	1.8329	09 06 18	58279
01 44 11.58	0.25	200.1	2.4	-4.8	8.39	1.7859	10 06 18	58280
01 44 11.90	0.57	202.8	2.8	-3.9	8.72	1.8829	11 06 18	58281
01 44 11.74	0.40	202.1	2.3	-3.6	8.43	1.8132	12 06 18	58282
01 44 11.57	0.22	192.5	2.7	-3.1	8.92	1.8275	13 06 18	58283
01 44 12.32	0.95	198.4	2.6	1.6	9.08	1.9187	14 06 18	58284
01 44 12.02	0.63	188.7	6.8	81.6	8.97	1.8011	15 06 18	58285
01 44 11.73	0.32	203.2	2.7	-6.9	9.06	1.9605	16 06 18	58286
01 44 11.88	0.45	192.4	2.9	-2.0	9.05	1.8528	17 06 18	58287
01 44 11.87	0.43	191.2	2.9	2.1	8.90	1.8108	18 06 18	58288
01 44 12.24	0.78	193.2	2.5	3.4	8.61	1.7709	19 06 18	58289
01 44 12.12	0.66	196.5	2.5	3.4	8.83	1.8475	20 06 18	58290
01 44 12.25	0.78	192.4	3.2	10.0	9.71	1.9894	22 06 18	58292
01 44 11.75	0.23	199.3	2.5	10.0	11.46	2.4327	23 06 18	58293
01 44 12.11	0.57	196.0	2.6	10.0	8.59	1.7919	25 06 18	58295
01 44 11.61	0.05	206.7	2.4	10.0	8.60	1.8912	26 06 18	58296
01 44 11.91	0.33	202.6	2.5	10.0	8.63	1.8618	27 06 18	58297
01 44 11.93	0.33	188.5	2.7	10.0	9.09	1.8239	28 06 18	58298
01 44 12.13	0.51	202.0	2.5	10.0	8.45	1.8170	29 06 18	58299

Погрешности в пределении потоков источников на записях обзора после процедуры их осреднения были рассчитаны по формуле:

$$\sigma^2 = \Delta S_\nu^2 + k_{\Delta H} S_\nu^2, \text{ где}$$

S_ν — рассчитанное значение плотности потока источника на данной частоте обзора, ν ; ΔS_ν — ошибка определения плотности потока на данной частоте; $k_{\Delta H}$ — параметр, зависящий от отношения сигнал/шум и определяемый по выборке калибровочных источников на кривой $S_\nu/T_a \sim f(\Delta H)$; k_H — параметр, связанный с погрешностью в определении координат и потоков калибровочных источников в зависимости от смещения от центра ДН радиотелескопа по высоте (ΔH).

1.4 Математические методы анализа данных

1.4.1 Индексы переменности

Индекс переменности V_S , согласно [67], вычисляется по максимальному S_{\max} и минимальному S_{\min} значениям спектральной плотности потока за все время наблюдений:

$$V_S = \frac{(S_{\max} - \sigma_{S_{\max}}) - (S_{\min} + \sigma_{S_{\min}})}{(S_{\max} - \sigma_{S_{\max}}) + (S_{\min} + \sigma_{S_{\min}})}, \quad (1.7)$$

где $\sigma_{S_{\max}}$ и $\sigma_{S_{\min}}$ — ошибки измерений. Неопределенность ΔV_S индекса переменности была рассчитана согласно выражению

$$\Delta V_S = \frac{2S_{\min}(\sigma_{S_{\min}} + \sigma_{S_{\max}})}{(S_{\min} + S_{\max})^2}. \quad (1.8)$$

Фракционная переменность F_{var} [68] характеризует уровень переменности относительно среднего значения:

$$F_{\text{var}} = \sqrt{\frac{V^2 - \bar{\sigma}_{\text{err}}^2}{\bar{S}^2}}, \quad (1.9)$$

где V^2 – дисперсия, \bar{S} – средняя спектральная плотность потока, $\bar{\sigma}_{\text{err}}$ – средне-квадратичная ошибка измерения.

Неопределенность F_{var} определяется следующим образом:

$$\Delta F_{\text{var}} = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{2N}} \frac{\bar{\sigma}_{\text{err}}^2}{F_{\text{var}} * \bar{S}^2}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\bar{\sigma}_{\text{err}}^2}{N}} \frac{1}{\bar{S}}\right)^2}. \quad (1.10)$$

Оценка уровня переменности относительно средней спектральной плотности потока \bar{S} без учёта ошибок измерений используя индекс модуляции M [69]:

$$M = \frac{\sigma_{\bar{S}}}{\bar{S}}, \quad (1.11)$$

где $\sigma_{\bar{S}}$ – стандартное отклонение средней спектральной плотности потока \bar{S} .

1.4.2 Анализ методом структурной функции

Структурная функция (СФ, structure function, SF) измеряет среднее значение дисперсии измеренной спектральной плотности потока $S(t)$, разделенных заданным интервалом времени, τ .

Строится в плоскости $\log \tau \sim \log SF$ СФ- средний квадратный корень разности плотности потоков в зависимости в зависимости от временной задержки (лага) между измерениями. Эта функция менее чувствительна к сглаживанию и другим проблемам с временной дискретизацией, чем спектральное распределение мощности (PSD) [70]. Впервые анализ переменности астрофизических данных методом структурных функций описан в работе [71]. Формула структурной функции первого порядка для функции $S(t)$:

$$SF(\tau) = \langle [S(t + \tau) - S(t)]^2 \rangle, \quad (1.12)$$

где τ - задержка по времени.

Дискретное представление структурной функции, позволяющее работать с неравномерными временными рядами:

$$D_1(k) = \frac{1}{N_1(k)} \sum_{i=1}^N w(i)w(i+k)[f(i+k) - f(i)]^2, \quad (1.13)$$

где $f(i)$ - временной ряд полученных наблюдений, $i = 1, 2, \dots, N$, $N_1(k) = \sum w(i)w(i+k)$, $w(i)$ - весовой коэффициент, k -начальный интервал времени, характерная скважность наблюдений. $w(i)=1$ для существующих данных и $w(i)=0$ для отсутствующих(пропущенных?) во временном ряду значений.

Структурная функция характеризуется наклоном b между двумя плато и временным масштабом τ , при котором функция достигает плато при $SF > 2\sigma^2$. Для упрощения анализа структурная функция нормируется на $2\sigma^2$. Тогда плато достигается при значениях $\log SF > 0.3$. Временной масштаб- максимальный масштаб коррелированного поведения сигнала, либо, эквивалентно, минимальный масштаб некоррелированного поведения. Величина наклона b характеризует природу переменного процесса. Наклон $b=0$ характеризует белый шум, при $0 < b < 1$ процесс является комбинацией белого шума (шума мерцания ?) и красного (дробового шума). В случае единичной доминирующей вспышки $b > 1$, а $b \sim 2$ указывает о сильном линейном тренде, либо о сильных периодических осцилляциях [72].

Структурная функция состоит из трёх компонент – начальное плоское плато, характеризующее шум, участок монотонного роста и второе плато, характеризующее переменность сигнала. Локальные минимумы структурной функции на верхнем плато характеризуют временные удвоенные масштабы переменности сигнала [73].

Структурная функция характеризуется углом наклона β между двумя плато, где $SF(\tau) \propto \tau^\beta$.

Впервые аппарат структурных функций был введён российским академиком А. Н. Колмогоровым в 1941 г. для изучения турбулентности плазмы [75; 76]. В астрономии метод SF впервые применён для анализа мерцаний на межзвёздной среде [77]. А для анализа свойств переменности АЯГ структурные функции были впервые применены в 1985 году для анализа свойств выборок источников с плоскими и степенными спектрами [71].

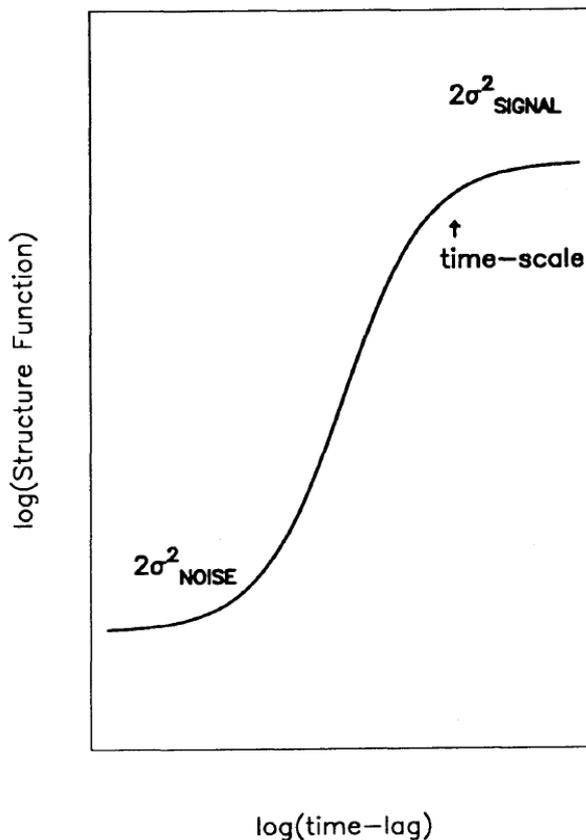


Рисунок 1.9 — Схематическое изображение идеальной структурной функции.
Займствованно из работы [74]

СФ связана с автокорреляционной функцией (ACF) следующим соотношением:

$$SF^2 = 2\sigma^2[1 - ACF(\Delta t)]. \quad (1.14)$$

Минимум автокорреляционной функции также указывает на переменные масштабы. Обе функции связаны между собой. В настоящее время анализ методом структурных функций широко используется в астрофизике для исследования свойств переменности различных объектов во всём диапазоне ЭМ спектра (см. например ...?) [78].

Анализ методом SF показывает свойства наблюдаемой кривой блеска, а не истинного процесса вызывающего переменность излучения.

Структурная функция нормируется на σ^2 и представляется в в двойной логарифмической шкале, что делает её форму универсальной для всех кривых блеска, а плато достигается при значении > 0.3

1.4.3 Обобщённая периодограмма Ломба-Скаргла

Для поиска периодичности сигнала на кривых блеска была использована Периодограмма Ломба-Скаргла – метод, позволяющий осуществлять поиск периодичности регистрируемого сигнала. Метод разработан для данных, имеющих нерегулярный шаг (пропуски), что даёт возможность использовать его для астрономических наблюдательных данных [79; 80].

Периодограмма может быть записана следующим образом [81]:

$$P_{LS}(f) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sum_j X_j \cos \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{[\sum_j X_j \sin \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}, \quad (1.15)$$

где X_j -измерение в момент времени t_j , круговая частота $\omega = 2\pi f$, τ - смещение по времени.

$$\tan(2\omega t) = \frac{\sum_j 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j} \quad (1.16)$$

1.5 Выводы Главы 1

- Разработана методика для обработки источников обзоров, в азимуте 270° на разных частотах наблюдений. В методике учтены абберационные искажения ДН антенны, угловое прохождение источников под параллактическим углом, коррекция записей за изменение усиления радиометров в зависимости от окружающей температуры и изменения положения источников вследствие прецессии и нутации. Предложен способ обработки, который позволяет определять положение обнаруженных источников с точностью до 1-2 секунд времени.
- На основе разработанной методики обработки наблюдений радиоисточников в обзорах на Западном секторе РАТАН-600 в режиме неподвижной антенны измерено 6080 плотностей потоков излучения на 4.7 ГГц с точностью 2 - 7 %.

- На основе разработанной методики, сделана оценка источников обзора по спектральной плотности потока, проведены исследования радиоспектров, а также переменность излучения в течение одного года.

Глава 2. Исследование источников в обзоре неба на склонении пульсара в Крабовидной туманности на РАТАН-600

Проведение обзоров неба является важной задачей многих телескопов в мире. Слепые обзоры, особенно малоизученных слабых популяций источников, представляют большую научную ценность. Их систематизация, комплексное исследование в разных спектральных диапазонах и отождествление с источниками других каталогов и в оптике, позволяют понять как природу самих объектов, так и проследить их эволюцию. РАТАН-600, крупнейший радиотелескоп рефлекторного типа, отвечает требованиям исследования слабых источников в широком диапазоне длин волн со сравнительно большим полем зрения. Последнее позволяет проводить статистические работы большой выборки источников, как уже известных, так и популяции новых источников.

Целью данного исследования является выборка из 205 относительно ярких радиоисточников на частоте 4.7 ГГц, их спектральные свойства и оптические отождествления, каталог радиоисточников и кривые блеска наиболее ярких источников, определение параметров изменения излучения на масштабах времени до одного года.

2.1 Наблюдения и обработка

Наблюдения проводились на Западном секторе (азимут 270°) РАТАН-600 при неподвижно стоящей антенне, сфокусированной на один из самых ярких объектов на небе в радиодиапазоне — Крабовидную туманность. Обзор проводился в течение года с 28 мая 2018 г. по 30 мая 2019 г. на комплексе из трех однотипных радиометров на центральной частоте 4.7 ГГц ($\lambda = 6.38$ см) и с полосой пропускания 600 МГц, разделенной на каналы шириной 150 МГц, каждый [60]. Входные рупора трех радиометров располагались вдоль фокальной линии вторичного зеркала таким образом, что второй рупор находился в фокусе радиотелескопа.

В этом обзоре были обнаружены 205 относительно ярких источников, отождествленных методом кросс-идентификации с данными из базы астрофизических каталогов CATS [65] для построения континуальных радиоспектров источников. Используя полученные данные, были уточнены и дополнены радиоспектры источников, проанализированы кривые блеска источников на разных временных масштабах в течение года и выполнена оценка переменности плотности потока. Выборка источников была получена при усреднении скорректированных записей за год наблюдений. Для достижения максимального отношения сигнал/шум к осредненным записям применялась свертка с реальной ДН, полученной по ярким источникам обзора. Критерием включения источников в выборку ярких объектов было $S/N > 50$ при антенной температуре $T_a \geq 5$ мК. В результате для всей выборки источников, расположенных с выносом $|dH| < 10'$ от центра ДН антенны, минимальная плотность потока составила 15 мЯн. Все обнаруженные источники имеют NVSS-отождествления из базы данных CATS с достаточно точными координатами ($< 1''$).

2.2 Радиоспектры

В обзоре [82] были исследованы источники с различным спектральным распределением энергии: источники с пиком на частоте порядка 1 ГГц (Gigahertz peaked spectrum, GPS), компактные источники с ультракрутым спектром (Compact steep spectrum, CSS) и источники с пиком на высоких частотах (High frequency peaked, HFP), которые представляют собой класс радиоизлучающих активных ядер галактик (АЯГ), которые, как считается, являются молодыми предшественниками массивных АЯГ, таких как Центавр А и Лебедь А [83–86]. Спектры источников GPS и HFP имеют заметный пик и понижение потоков по обе стороны от пика. Полагают, что источники CSS обладают свойствами, сходными с источниками GPS и HFP, но их пиковые частоты значительно ниже [87]. Следовательно, основным различием между источниками GPS, CSS и HFP является частота спектрального пика и размер объекта. Источники GPS и HFP имеют линейные размеры примерно 1 кпк и пиковые частоты около 1–5 ГГц и более 5 ГГц, соответственно [88]. В то время как CSS источники

Таблица 5 — Классификация радиоспектров, $S_\nu \sim \nu^\alpha$

Тип	Критерий
Пиковой	$\alpha_{\text{low}} > 0, \alpha_{\text{high}} < 0$
Плоский	$-0.5 \leq \alpha \leq 0.3$
Инвертированный	$\alpha > 0.3$
Степенной	$-1.0 \leq \alpha < -0.5$
Крутой	$-1.3 \leq \alpha < -1.0$
Ультракрутой	$\alpha < -1.3$

имеют линейный размер около 1–20 кпк и, как принято считать, имеют самые низкие пиковые частоты, до сотен мегагерц.

С помощью базы данных CATS источники выборки были отождествлены с источниками других радиокаталогов на различных частотах. По данным обзора и литературным данным были построены радиоспектры исследуемых объектов. Для этого использовалась программа `spg` из пакета `FADPS` [89]. Как показал подсчет, данные на частоте больше 4 ГГц были впервые получены для четверти источников, а для остальной части выборки источников дополнены.

Спектральный индекс рассчитывались как тангенс угла наклона прямой на графике $\log \nu \sim \log S_\nu$ ($S_\nu \sim \nu^\alpha$) между данными NVSS на 1.4 ГГц и данными, полученными в данной работе на 4.7 ГГц. Ошибка спектрального индекса рассчитывалась по известным формулам.

В данной работе используется классификация радиоспектров, представленная в Таблице 5.

У 16 источников в нашем обзоре частоты максимальных плотностей потоков ниже 1 ГГц, что следует, как правило, из измерений низкочастотного обзора GLEAM. Такие объекты — кандидаты в CSS-источники. Пять источников, имеющие максимум потоков в диапазоне частот 1–2 ГГц, являются кандидатами в GPS-источники. Пиковая частота NVSS J072614+215319 равна 8.5 ГГц, и он относится к HFR-источникам.

Источники USS (Ultra steep spectrum) определяются как компактные радиоисточники с $\alpha < -1.1$. Им уделялось внимание при поиске АЯГ с большим z , так как в ряде работ было показано, что крутые спектры соответствуют самым высоким красным смещениям [90–93]. Укручение спектральных индексов источников на низких частотах с увеличением плотности потока было приведено в работах [94–96], а также в работе [97] для 43 000 источников каталога VCSS на частоте 340 МГц. В работе [98] построена зависимость на частоте 3.94 ГГц

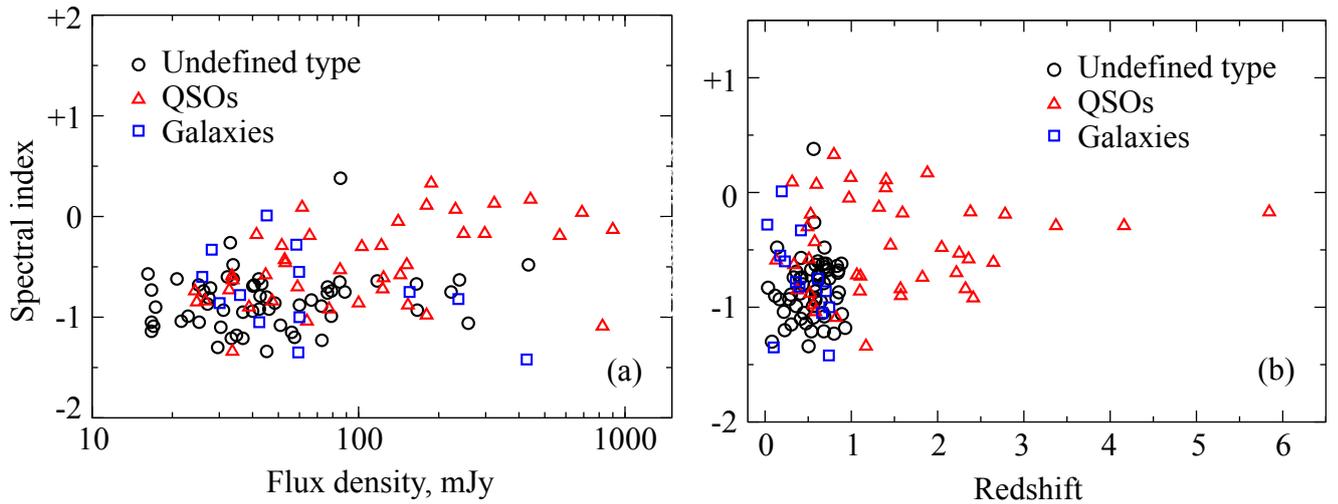


Рисунок 2.1 — Зависимость спектральных индексов 205 источников выборки на частоте 4.7 ГГц от плотности потока (a) и красного смещения z (b).

Незаполненными кружками показаны источники неизвестного типа, треугольниками и квадратами — квазары и галактики соответственно.

для 304 и 396 радиоисточников каталога RC, в которой получена обратная зависимость — уплощение спектральных индексов, что в основном характерно для вклада далеких и ярких квазаров. Этот же результат получен и в данной работе на частоте 4.7 ГГц. (Рис. 2.1, слева).

В зависимости ”красное смещение–спектральный индекс” по данным нашей работы также просматривается уплощение спектральных индексов квазаров с ростом z (Рис. 2.1, справа). Однако в работе [99] на 178 МГц, с $S_{178} \geq 10$ Ян явно прослеживается укрупнение спектральных индексов с увеличением красного смещения для галактик с мощным радиоизлучением и крутыми спектрами. Это другой класс объектов с USS, High- z radio galaxies (HzRGs) — галактики с активным звездообразованием на больших z . Часть обнаруженных галактик данной работы, по-видимому, также относится к этому классу объектов.

Распределение спектральных индексов приведено на Рис. 2.2, его пиковое значение $\alpha \approx -0.9$. Классификация показала, что 124 источника (61%) имеют нормальный степенной спектр ($-1.1 < \alpha < -0.5$), 22 (11%) являются источниками с пиком в спектре, 25 объектов (12%) — источники с очень крутым спектром, у 26 источников (13%) спектр плоский ($-0.5 < \alpha < 0.3$, три источника имеют инвертированный спектр ($\alpha > 0.3$), а восемь — укрупнение на низких частотах.

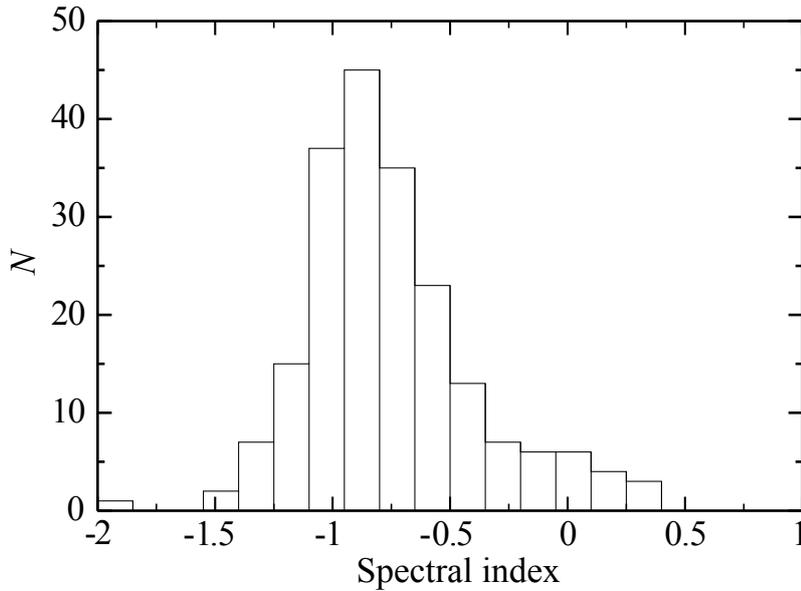


Рисунок 2.2 — Гистограмма распределения спектральных индексов источников выборки на частоте 4.7 ГГц.

Спектры 205 источников приведены на Рис. Приложения, где синими заполненными кружками обозначены данные из CATS, а красными — измеренные значения плотности потока на 4.7 ГГц по данным из настоящей работы. На спектрах приведено от одного до трех измерений, в зависимости от качества данных и выноса источников из фокуса трех радиометров.

2.3 Поиск переменности слабых источников ($S_\nu < 100$ мЯн)

На РАТАН-600 проводится многолетний мониторинг переменности объектов различных типов. Поиском долговременной переменности и вариаций излучения на шкале от одного дня и более для источников на склонениях 4° – 6° и 10° – $12^\circ.5$ длительное время (20 и 10 лет наблюдений соответственно) занималась группа ГАИШ МГУ [43; 100].

В данной работе мы руководствуемся двумя подходами к исследованию переменности источников выборки, рассматривая суточную переменность в течение года для подвыборки наиболее ярких источников (квазаров и блазаров) и оценивая индекс переменности при накоплении данных за каждый месяц наблюдений в течение года.

Расчет индекса переменности на масштабах года мы выполнили для всей выборки источников. Усреднение данных во всех случаях проводилось за каждый месяц наблюдений. В итоге для каждого источника выборки была построена кривая блеска из 12 средних амплитуд и их ошибок за весь год наблюдений. Все полученные данные корректировались за изменение усиления по кривым блеска калибровочного источника «Крабовидная туманность» с последующим гаусс-анализом. Безразмерный индекс переменности V_S мы рассчитывали по измененной формуле из [67], где вместо величин плотностей потоков используются их антенной температуры T_a . Такая замена позволяет оценить индекс переменности источников в зависимости от S/N .

У трети источников V_S был определен по наблюдениям в двух или трех лучах. Для анализа выбирались данные с максимальным значением T_a для источников, проходящих ближе к центру ДН входного рупора радиометра. Рассчитанные значения индекса переменности источников сведены в Таблице 6.

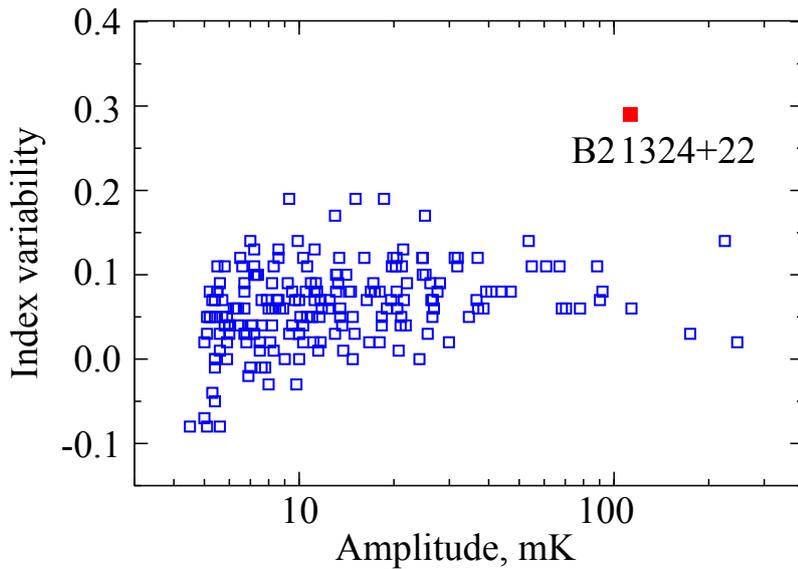


Рисунок 2.3 — Индексы переменности (в безразмерных единицах) для всех 205 источников на 4.7 ГГц. Блазар B2 1324+22 на $z = 1.4$ с изменением яркости более двух раз показан отдельно.

У более слабых источников обнаруженная переменность может быть связана с неточностью измерений на уровне относительно больших шумов ($S/N \sim 10-30$). Поэтому для источников с $T_a < 10$ мК (30%) оценка индекса проводилась с накоплением записей до двух месяцев. Наконец, для группы источников с амплитудой менее 6 мК (15%) накопление проводилось с интервалом в три месяца. На Рис. 2.3 приведены рассчитанные значения V_S , где присутствует

Таблица 6 — Измерения 205 радиоисточников. Фрагмент Таблицы из Приложения.

Source name — имя источника; R — номер луча (радиометра); V_S — индекс переменности и его ошибка; $S_{4.7}$ — плотность потока излучения и ошибка измерениям; ΔH — вынос относительно центрального сечения ДН; HW — полуширина скана источника, α — спектральный индекс и его ошибка; Nm — число месяцев, за которые получено осреднение записей.

Source name	R	$V_S \pm err$	$S_{4.7} \pm err$ mJy	ΔH [']	HW s	$\alpha \pm err$	Nm
000727+220413	1	0.14 ± 0.08	180.0 ± 11.8	11.3	15.5	-1.25 ± 0.06	12
001145+215912	1	0.05 ± 0.06	123.1 ± 6.6	3.3	10.9	-0.74 ± 0.06	12
002130+215319	3	0.12 ± 0.14	24.3 ± 3.1	0.2	11.0	-0.64 ± 0.09	12
002337+215624	1	0.07 ± 0.03	166.1 ± 6.8	-1.2	6.6	-0.81 ± 0.06	12
003147+215347	3	0.06 ± 0.02	258.2 ± 9.3	0.9	9.3	-0.86 ± 0.09	12
004157+215423	2	0.02 ± 0.12	32.2 ± 2.5	-1.3	11.9	-0.45 ± 0.13	12
011852+215144	2	-0.01 ± 0.15	40.6 ± 2.7	-5.8	12.8	-0.92 ± 0.07	12
012428+215454	2	0.11 ± 0.14	20.8 ± 1.7	-0.8	10.7	-0.63 ± 0.06	11
012729+215136	3	0.15 ± 0.14	17.0 ± 2.7	-2.9	12.0	-0.99 ± 0.08	12
013352+220125	1	0.11 ± 0.16	53.1 ± 4.1	6.5	13.5	-0.62 ± 0.08	12

только одно относительно большое значение $V_S = 0.3$. Это известный блазар NVSS J132700+221050 (B2 1324+22) на $z = 1.4$ с изменением плотности потока более чем в два раза в течение года. Еще пять источников имеют переменность излучения с $V_S \sim 0.2$ с изменением амплитуды в полтора раза. Это источники NVSS J114417+220752, NVSS J141726+220539, NVSS J160203+220931, NVSS J170744+220049 и NVSS J174005+221100. Для остальных источников $V_S < 0.15$, из чего следует, что на масштабах одного года 97% источников заметной переменностью не обладают.

2.4 Поиск переменности сильных источников ($S_\nu > 100$)

Для 26 наиболее ярких источников, проходящих относительно близко к центральному сечению ДН, были проведены более точные измерения амплитуды для поиска переменности на масштабах нескольких суток. Оптимальным по

точности результата было суммирование данных за трое суток наблюдений в каждой точке кривой блеска.

Для устранения негауссовости шума (помех) в кривые блеска каждого источника методом наименьших квадратов вписывался полином, относительно которого оценивались пороговые значения шума 3σ с удалением превышающих значений. Затем кривые блеска источников корректировались за сезонные температурные изменения усиления радиометров.

На Рис. 2.4 представлены кривые блеска квазаров с плоским радиоспектром и блазаров из выборки наиболее ярких 26 источников. Как было уже сказано выше, индексы переменности этих объектов, кроме B2 1324+22, имеют небольшие значения, из чего можно заключить, что, с учетом ошибок определения плотности потока, их уровень излучения изменился не более чем в полтора раза. Тем не менее, на рисунках заметны изменения яркости излучения в течение года. Так, три источника, а именно: NVSS J014235+215731, NVSS J180738+220456 и NVSS J203934+215209, вероятно, показывают периодичность на масштабах около одного года.

Еще у трех источников: NVSS J091224+220506, NVSS J103633+220312 и NVSS J164439+220214, отмечается рост плотности потока. У источника NVSS J013553+215816 наблюдался спад уровня излучения, с последующим подъемом через полгода наблюдений. У источника NVSS J043856+215157 было два уярчения в течение года. Первое произошло спустя 80 дней от начала обзора, второе — спустя 200 дней после первого. У самого яркого источника обзора ($S_{1.4} > 1$ Ян) NVSS J060351+215937 (4C +22.12), кандидата в блазары [101] со степенным спектром ($\alpha = -0.7$), изменений уровня излучения не обнаружено.

2.5 Кросс-идентификация с оптическими каталогами

Для источников выборки были проанализированы имеющиеся для них литературные данные. С этой целью методом кросс-идентификации в радиусе $15''$ мы провели отождествление с источниками базы астрофизических данных Vizier, NED, Roma-BZCAT. В результате была получена информация о физи-

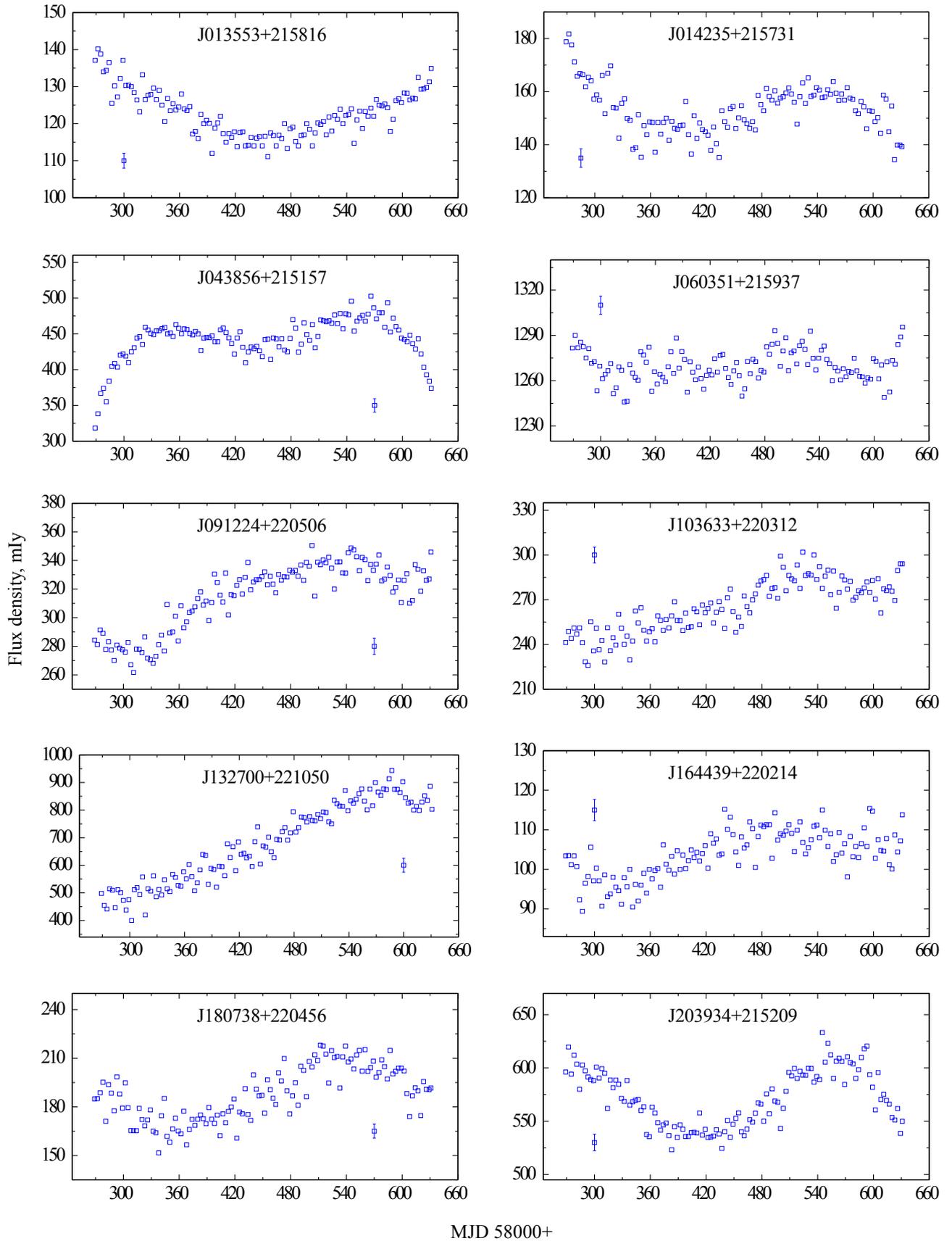


Рисунок 2.4 — Суточная переменность плотности потока квазаров и блазаров на частоте 4.7 ГГц. Название каталога NVSS для краткости опущено.

ческих характеристиках объектов: их оптические звездные величины, красные смещения и классы объектов (квазар, блазар, галактика и т.д).

В оптическом диапазоне большинство источников (147; 72%) отождествлено с каталогом SDSS (DR16). Так как обзор SDSS не покрывает всего неба, дополнительно проведено отождествление с оптическими каталогами Gaia DR3, Guide Star Catalog, Pan-STARRS. Из каталога SDSS взяты данные о звездных величинах в оптическом диапазоне, морфологические характеристики (протяженный/точечный), для протяженных — фотометрические красные смещения. Для части объектов в каталоге имеются спектроскопические данные, в таком случае известны физические характеристики объектов (их класс: галактика либо квазар) и их спектроскопические красные смещения. Отождествление с каталогом внегалактических объектов Gaia DR3 дало значения красных смещений еще для 18 объектов. Отождествление с 2MASS вне области покрытия SDSS дало морфологию для 35 объектов. Дополнительно, в каталоге Pan-STARRS вне области покрытия SDSS два источника отождествлены с пустыми полями. Всего 11 объектов выборки находятся в пустых оптических полях. Три источника расположены в оптических полях с большим количеством оптических источников каталога Pan-STARRS. Из-за большой плотности объектов на снимках и из-за отсутствия информации об их природе не удалось однозначно получить отождествление источников исследуемой выборки, попадающих в данное поле. Результаты отождествления приведены в Приложении.

При наличии нескольких измерений красных смещений объектов для дальнейшего анализа предпочтение отдавалось спектроскопическому методу. Три источника имеют близкие значения измерений спектральных красных смещений в разных независимых работах. Для источника NVSS J091914+22051 в Таблице приведено два значения спектроскопического красного смещения, так как они отличаются существенно.

В результате все источники были отождествлены с оптическими и инфракрасными каталогами. 44% процента источников являются протяженными, и 42% источников являются точечными. Остальные не отождествлены. Лишь 30% источников имеют определенный физический тип. Из всей выборки: квазары — 18%, блазары — 6%, галактики — около 6%.

Для 57% из отождествленных объектов известно красное смещение, спектроскопическое либо фотометрическое.

2.6 Радиосветимость источников

Для 112 объектов с известными красными смещениями рассчитана радиосветимость на частоте 4.7 ГГц.

Значения фотометрического расстояния были получены с помощью модуля `cosmology` пакета `astropy` для языка программирования Python. Расчетные значения радиосветимости на частоте 4.7 ГГц и их ошибки приведены в Приложении. Точность оценки радиосветимости определяется ошибками всех входящих в уравнение величин. Самые большие ошибки светимости связаны с существенными ошибками фотометрического красного смещения.

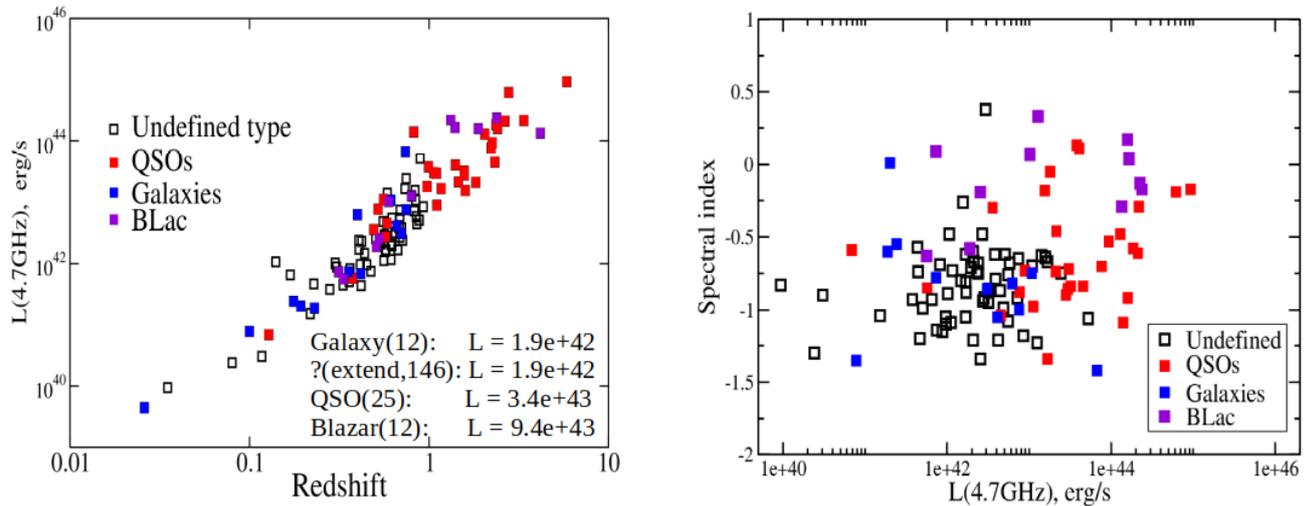


Рисунок 2.5 — Светимость источников на частоте 4.7 ГГц в зависимости от красного смещения для квазаров, галактик и источников неизвестного типа.

На Рис. 2.5 показано распределение вычисленных значений радиосветимости источников на частоте 4.7 ГГц в зависимости от красного смещения для квазаров, галактик и источников неизвестного типа. Учитывая, что объектами с низкой светимостью являются в основном протяженные объекты, можно предположить, что эти объекты являются галактиками. Объектами с наибольшей светимостью являются далекие квазары.

2.7 Выводы Главы 2

1. В обзоре за 2018–2019 гг. на Западном секторе радиотелескопа РАТАН-600 на склонении пульсара в Крабовидной туманности ($\text{Dec} = 22^\circ$) на трехлучевом радиометрическом комплексе на частоте 4.7 ГГц обнаружено 205 ярких источников. Для всех источников определены средние плотности потока: за год наблюдений, за каждый из 12 месяцев и за каждые три дня для 26 наиболее ярких из них.
2. По данным, полученным в настоящей работе, а также из базы данных CATS, построены континуальные радиоспектры всех 205 объектов выборки. Из них 124 источника (61%) имеют степенной спектр; 22 источника с пиковым распределением в радиоспектре – источники типа CSS - GPS; 25 источников являются источниками с USS; 26 источников имеют плоский спектр - квазары и блазары; три источника имеют инвертированный спектр, возможно тепловой; восемь источников имеют подъем в спектре на низких частотах. Для четверти источников в высокочастотной области спектра ($\nu \geq 4.7$ ГГц) данные были получены впервые, а для остальных дополнены либо уточнены. Пиковое значение распределения спектральных индексов $\alpha \approx -0.9$.
3. В зависимости «плотность потока – спектральный индекс» прослеживается укрупнение спектральных индексов с уменьшением плотности потока источников, а в зависимости «красное смещение – спектральный индекс» — уплотнение спектральных индексов с увеличением z , что не согласуется с такими распределениями на низких частотах. Мы полагаем, что это связано со значительным вкладом далеких квазаров с мощным радиоизлучением.
4. Получены оценки переменности источников как по индексу переменности на интервалах одного года, так и на интервале трех суток для 26 наиболее ярких источников. Оценка V_S показала, что у большинства источников выборки (97%) не было значительного изменения ($V_S < 0.15$) спектральной плотности потока. Однако блазар B2 1324+224 показал двукратное увеличение плотности потока в течение одного года ($V_S = 0.3$). У самого яркого источника обзора ($S_{1.4} > 1$ Ян) NVSS

- J060351+215937 (4C +22.12), кандидата в блазары, изменения в уровне излучения не обнаружено. Среди исследованных на суточную переменность источников два (NVSS J043458+215540 и NVSS J161334+220425) находятся в пустых полях SDSS. Еще для семи источников из литературы неизвестен их класс.
5. Методом кросс-идентификацией с источниками оптических каталогов SDSS (DR16), Gaia (DR3) Extragalactic, Pan-STARRS, инфракрасного 2MASS и с источниками баз данных SIMBAD, NED, Roma-BZCAT отождествлено 86% источников выборки. Протяженными являются 44% процента источников, точечными — 42%. Остальные не отождествлены. Лишь 30% источников имеют определенный физический тип. Во всей выборке: квазаров — 18%, блазаров — 6%, галактик — около 6%. Протяженные объекты, вероятно, связаны с более слабыми или далекими галактиками. Отождествлены только с инфракрасными данными 35 объектов.
 6. Для 112 отождествленных объектов (57%) известно красное смещение. Для этих источников рассчитана светимость, наибольшую из которых показывают далекие квазары.

Глава 3. HFP блазар PKS 1614+051

3.1 Радиоисточники с пиком на высоких частотах (HFP)

Источники с пиком ν_{peak} в спектре радиоизлучения, приходящимся на радиочастоты, называются peaked-spectrum или PS-источниками и, в зависимости от его положения, классифицируются как CSS (Compact Steep-Spectrum, $\nu_{peak} \leq 1$ ГГц), GPS (Gigahertz Peaked-Spectrum, ν_{peak} между 1 и 5 ГГц) и HFP (High Frequency Peakers, $\nu_{peak} > 5$ ГГц) (O’Dea 1990, еще ссылки). Ответственными за наличие спектрального пика обычно считаются механизмы синхротронного самопоглощения (synchrotron-self absorption – SSA [102; 103]) или свободно-свободного поглощения (free-free absorption – FFA [104]). Схематически такой спектр показан на Рис. 3.1.

Эти механизмы объясняют наблюдаемую антикорреляцию между частотой пика в спектре и видимым линейным размером источника [105; 106]. Согласно этой антикорреляции, чем выше частота пика, тем компактнее радиоисточник. Поэтому объекты HFP рассматриваются как кандидаты в молодые радиоисточники (2003PASA...20...79D). Плотная окружающая среда так же рассматривается как причина того, что источник не расширился и остается компактным (ССЫЛКА). Согласно предположению о молодом возрасте HFP-объектов, они могут эволюционировать в протяженные объекты и представляют самые ранние стадии эволюции галактик [107; 108]. Поскольку пиковая форма спектра наблюдается и у вспыхивающих блазаров, различить истинно молодые компактные радиоисточники и блазары можно только на основе многоволновых и долговременных измерений в радиоконтинууме.

Радиоисточники с пиком в спектре (PS радиоисточники) излучения являются отдельным предметом исследования начиная с начала 80-х годов прошлого века. В работе Peacock и Wall [109] по картированию полной выборки ярких источников ($S_{2.7} > 1.5$ Ян) показано, что более компактные радиоисточники имеют более плоские двухчастотные радиоспектры между 5 и 2.7 ГГц ($\alpha > -0.5$, $S_\nu \propto \nu^\alpha$). Теми же авторами в работе [110] был выделен отдельный класс компактных радиоисточников со степенными спектрами (CSS).

Phillips и Mutel [108] в 1982 г. обратили внимание на то, что двойные радиоисточники имеют, как правило, инвертированный спектр либо спектр с пиком. При этом расстояние между компонентами таких источников больше, чем размеры самих источников. На радиокартах они похожи на FR II, но в 100-1000 раз меньше [111] и имеют размер $\sim 10\text{--}1000$ пк [112]. Сегодня эти источники известны, как радиоисточники CSO (Compact Symmetric Objects, компактные симметричные объекты). Предполагается, что значительная часть галактик FR 0 является CSS либо PS радиоисточниками [113]

Механизм формирования пикового радиоспектра

В однородном магнитном поле заряженная частица движется вдоль линии магнитного поля по спиральной траектории с постоянной линейной и угловой скоростями.

В большинстве источников синхротронного излучения электроны распределены по степенному закону:

$$n(E)dE \propto E^{-\gamma}dE, \quad (3.1)$$

где $n(E)$ - число электронов в зависимости от их энергии E , γ - безразмерный показатель степени распределения.

Наблюдаемый спектральный индекс зависит от γ как $\alpha = -(\gamma - 1)/2$.

Формула синхротронного спектра однородного сферического источника может быть записана следующим образом (например, Пахольчик):

$$S_\nu = \left(\frac{\nu}{\nu_p}\right)^{5/2} \cdot \left(1 - \exp\left\{-\left(\frac{\nu}{\nu_p}\right)^{-(\gamma+4)/2}\right\}\right), \quad (3.2)$$

где ν_p - частота, при которой оптическая толща $\tau=1$. Либо в терминах оптической толщи(например, [114]):

$$S_\nu = a_1 \left(\frac{\nu}{\nu_p}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{1 - \exp(-\tau)}{\tau}\right), \quad (3.3)$$

где $\tau = \left(\frac{\nu}{\nu_p}\right)^{-(\gamma+4)/2}$, a_1 - амплитуда синхротронного спектра.

Так как реальные астрофизические источники неоднородны, синхротронное самопоглощение всегда дает наклоны намного ниже $5/2$ и менее выраженный пик.

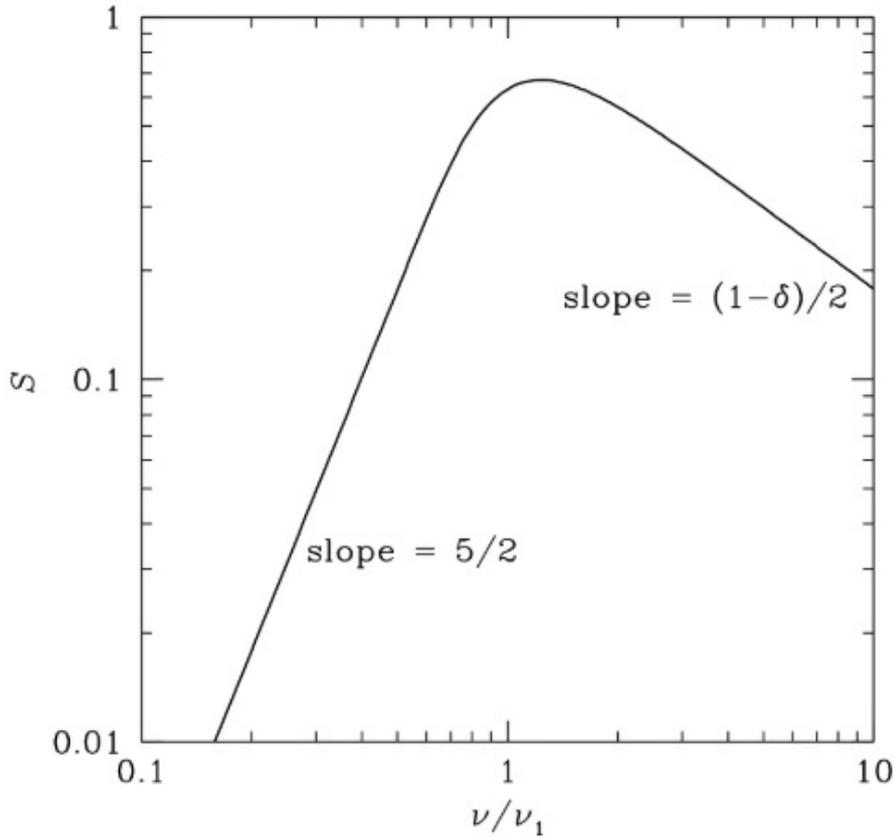


Рисунок 3.1 — Теоретический спектр однородного сферического синхротронного радиоисточника. Взаимствовано из Condon, James J., and Scott M. Ransom. *Essential Radio Astronomy*. Princeton University Press, 2016

В случае свободно-свободно механизма (FFA) синхротронный фотон поглощается тепловыми электронами плазмы. Электрон, находящимся в поле иона поглощает фотон. До и после поглощения фотона электрон остаётся свободным, увеличивая кинетическую энергию на величину $E = h\nu$. В случае внешнего однородного FFA-поглощения плазма находится вне синхротронного источника, и зависимость спектральной плотности потока от частоты имеет следующий вид (например, [114]):

$$S_\nu = a_2 \nu^\alpha \exp(-\tau_\nu), \quad (3.4)$$

где $\tau_\nu = (\frac{\nu}{\nu_p})^{-2.1}$, a_2 — амплитуда синхротронного спектра. В случае когда поглощающая плазма перемешана с излучающими электронами FFA-поглощение на-

Таблица 7 — Классификация радиоисточников с пиков в спектре излучения

Класс объекта	Характеристика спектра	Линейные размеры, кпк	Ссылки
MPS	$\nu_p < 1$ ГГц	?	[106]
GPS	$0.5 < \nu_p < 5$ ГГц	1	
HFP	$\nu_p > 5$ ГГц	?	
CSS	$-0.5 < \alpha < 0.5$	0.5–20	
CSO	$\alpha < 0.5$	< 1	

зывается внутренним неоднородным. В данном случае спектральная плотность потока зависит от частоты следующим образом:

$$S_\nu = a_3 \nu^\alpha \cdot \left(\frac{1 - \exp(-\tau_\nu)}{\tau_\nu} \right), \quad (3.5)$$

где $\tau_\nu = \left(\frac{\nu}{\nu_p}\right)^{-2.1}$, a_3 – параметр нормализации.

При этом стоит отличать истинные PS радиоисточники с постоянной пиковой формой спектра от переменных объектов, у которых пиковая форма спектра проявляется временно во время вспышек [115] и рождения “молодых” и компактных компонент с синхротронным самопоглощением (). Хотя форма истинных PS радиоисточников является неизменно пиковой, сама пиковая частота и форма радиоспектра могут изменяться (). Особенностью источников с пиком является их компактность, которая является критерием определения объекта как PS радиоисточника с помощью РСДБ-карт(). Таким образом, можно суммировать классификацию PS радиоисточников в зависимости от величины пиковой частоты и линейного размера: радиоисточники с пиком на частоте нескольких сотен МГц (Megahertz peaked sources, MPS), источники с пиком на частоте 1–5 ГГц (Gigahertz peaked spectrum, GPS), источники с пиком на частотах более 5 ГГц (High frequency peaked, HFP), а так же компактные источники с со степенным спектром (Compact steep spectrum, CSS). Таблица 7 суммирует данную классификацию.

Полагают, что источники CSS обладают свойствами, сходными с источниками GPS и HFP, но их пиковые частоты значительно ниже (ссылка??). Следовательно, основным различием между источниками GPS, CSS и HFP являются частота спектрального пика и размер объекта. HFP имеют видимый линейный размер... Источники GPS имеют линейные размеры порядка 1 кпк, в

то время как CSS-источники имеют линейный размер около 1–20 кпк [83] и, как принято считать(), имеют самые низкие пиковые частоты, до сотен мегагерц.

Впервые HFR радиоисточники были выделены в отдельный класс в работе D. Dallacasa и других в 2000 году [116]. Авторы определили HFR радиоисточники как источники с пиковым радиоспектром континуума, с максимумом на частоте больше нескольких ГГц. В результате наблюдений на 8 частотах в диапазоне от 1.4 до 22.5 ГГц радиоинтерферометра VLA, был получен список ярких ($S_5 > 0.3$ Ян) 55 HFR радиоисточников. В дальнейшем, эти источники наблюдались на радиоинтерферометре VLA с целью получения информации об их размере и морфологии. Оказалось, что пиковая форма радиоспектра континуума не всегда является постоянной характеристикой объекта, и в выборку вошли не только молодые объекты, но и блазары, которые были на момент наблюдений в стадии вспышки с компонентой с сильным синхротронным самопоглощением [115]. Той же группой в 2009 году выборка была дополнена слабыми ($S_5 > 50$ мЯн) HFR радиоисточниками и их общее количество составило 61 [117]. Из-за эффекта релятивистского замедления времени, для подтверждения постоянства излучения более далёких объектов, требуется всё большее время наблюдений.

Существующая антикорреляция между видимыми линейными размерами источника l и пиковой частотой радиоспектра ν_p , где $\nu_p \propto l^{-0.65}$ [] позволяет предполагать, что компактные источники являются либо молодыми, либо источниками в плотном газовом окружении. Таким образом, HFR представляются источниками на самых ранних стадия эволюции существующих АЯГ [83].

Благодаря своей компактности и симметричности, GPS и HFR радиоисточники, находясь в пределах центрального региона излучения узких линий (NLR, narrow-line region) АЯГ, могут помочь в изучении газовой составляющей родительской галактики и эволюции радиоисточников.

По сценарию, при котором наиболее компактные радиоисточники являются более ранней стадией источников менее компактных и далее протяженных, HFR радиоисточники являются представителями объектов на наиболее ранних стадиях эволюции. При дальнейшем расширении источники переходят в класс GPS, MPS и в наименее компактные CSS [118; 119].

3.2 Квazar PKS 1614+051

Далекий ($z = 3.21$, [56]) источник PKS 1614+051 является ярким радиогромким квазаром [120], существующим в эпоху, составляющую порядка 15% от настоящего возраста Вселенной. Классифицирован как FSRQ (Flat spectrum radio quasar, квазар с плоским спектром) согласно классификации BZCAT [49]. PKS 1614+051 известен так же как PS источник (PS) [84; 121; 122] с частотой максимума 4–5 GHz, что делает его так же и источником с пиком на высокой частоте (HFR) [115; 116; 123].

Анализ оптических данных (Stanghellini et al., 1993; Snellen et al., 2002; Orienti et al., 2010; Husband et al., 2015) показал наличие компаньонов вблизи многих объектов HFR, расположенных в галактиках. Это подтверждает гипотезу о том, что взаимодействия между галактиками играют решающую роль в происхождении радиоизлучения от таких молодых объектов. PKS 1614+051 интересен как далекий HFR-квазар, который может быть кандидатом в молодые источники с возрастом 10^2 – 10^3 лет (Dallacasa et al., 2000). Согласно предположению о молодом возрасте HFR-квазаров (например, Blake, 1970; Phillips and Mutel, 1982), такие объекты будут эволюционировать в протяженные радиогалактики и квазары (например, FR I или FR II). Однако, поскольку пиковая форма спектра также встречается у вспыхивающих блазаров, необходимо различать по-настоящему молодые компактные радиоисточники и блазары. В этом могут помочь многоволновые и долговременные исследования HFR-радиоисточников.

Радиоспектр PKS 1614+051 был изучен в ряде работ, в которых частота ν_p пика была определена равной 4.1 ГГц [116], 4.7 ГГц [85], 5.8 ГГц [123] и 4.4 ГГц [122]. На РСДБ-изображениях на 8.4 ГГц блазар имеет яркую центральную компоненту и слаботоразрешаемую структуру в направлении на юго-запад; на частоте 15 ГГц присутствуют две компоненты на расстоянии ~ 1.4 mas (11 пк). Морфологически источник классифицируется как CSO [123].

Радиосветимость $L_\nu = 8.63 \pm 0.8 \cdot 10^{44}$ и радиогромкость $Rl = 7.9 \cdot 10^3$ блазара оценены в работе [122]

Суммарный широкодиапазонный радиоспектр PKS 1614+051 был построен на основе литературных измерений, заимствованных в базе данных CATS

[124; 125] и измеренных значений в настоящей работе на частотах 2.3 и 4.7 ГГц (обозначены красными точками). Спектр представлен на Рис. 3.3. С учетом этого частота ν_p пика была определена равной 3.7 ГГц, что ниже, чем в указанных ранее работах. Как яркий блазар (спектральная плотность потока в максимуме спектра достигает 1.5 Ян) он являлся целевым источником многих наблюдательных кампаний (порядка 50) в диапазоне частот 0.076–37 ГГц. Общее число литературных данных составляет порядка 900 измерений. В таблице 8 представлен список основных каталогов, которые были использованы для построения радиоспектра PKS 1614+051.

Таблица 8 — Основные каталоги, использованные для построения радиоспектра PKS 1614+051

1 – инструмент или название каталога из CATS; 2 – период наблюдений; 3 – число измерений; 4 – частота; 5 – ссылка

Каталог	Период	N_{obs}	Частота, ГГц	Ссылка
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
RCSP	1980–1981	25	0.365–11.1	[16]
GB6	1986 – 1987	1	4.85	[5]
87GB	1987	1	4.85	[126]
GBIMO	1988–1994	578	2.25, 8.3	[28]
FIRST	1993 – 1995	1	1.4	[127]
NVSS	1993 – 1996	1	1.4	[6]
MGPS2	1996–1997	22	2.3, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7	[128]
Kov97	1997	6	2.3, 3.9, 7.7, 11.2, 21.7	[44]
GPSDa	1998–2000	11	1.4, 5.0, 8, 15, 22	[116]
GPSTi	2000	8	1.4, 1.7, 4.5, 5.0, 8.1, 8.5, 14.9, 22.5	[115]
GPSra	2006–2010	24	1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7	[129]
CGR15	2008–2009	142	15	[26]
TGSS	2010 – 2012	1	0.15	[130]
RATAN-600	2011–2016	5	1.2, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2	[131]
RATAN-600	2012–2020	10	2.3, 4.8, 7.7, 11.2, 22	[122]
GLEAM	2013–2014	21	0.076–0.220	[9]

В рамках программы многочастотного мониторинга блазаров на РАТАН-600 [132] индекс переменности радиоизлучения V_S был измерен как 0.1 на 5 ГГц на масштабе наблюдений 43 года и $V_S=0.2$ на 22 ГГц.

В настоящей работе исследуются свойства переменности радиоизлучения блазара PKS 1614+051 на частоте 4.7 ГГц на временном масштабе 375 дней. Целью исследования является определение таких параметров переменности, как амплитуда, масштабы и возможная периодичность.

3.3 Наблюдения и обработка

Наблюдения блазара PKS 1614+051 проводились на Западном секторе РАТАН-600 (азимут = 270°) с 30.05.2019 по 08.06.2020 гг. в режиме обзора на склонении известного микроквара SS 433 (Dec=J 04:58:57). Первая часть наблюдений проводилась на комплексе из трёх радиометров на частоте 4.7 ГГц в период с 30.05.2019 по 20.11.2019 гг. Позже был добавлен ещё один аналогичный радиометр, и наблюдения второй части обзора проводились на четырёх радиометров с 21.11.2019 по 08.06.2020 гг. Все радиометры были четырёх-канальными, с шириной полосы пропускания 150 МГц, каждый. В первой части наблюдений в фокусе антенны располагался входной рупор второго радиометра, во второй фокус находился между рупорами второго и третьего радиометров. Расстояние между рупорами радиометров в первой части обзора: -92, 0, +92, в мм. Во второй части: -138, -46, +46, +138, в мм. Это соответствует смещению в угловой мере для первой части обзора: $-2'2''$; $0'$; $2'2''$, для второй: $-3'3''$; $-1'1''$; $1'1''$; $3'3''$. Наблюдения проводились с неподвижными элементами антенны Западного сектора с вторичным зеркалом №5, стоящим с неподвижным фокусом. Особенности прохождения источников через диаграмму телескопа были описаны в Главе 1. С 13 августа 2019 г. был подключен широкополосный радиометр на более низкой частоте 2.3 ГГц.

Привязка данных проводилась отдельно для двух циклов наблюдений на 4.7 ГГц, а также на частоте 2.3 ГГц. Данные в каналах каждого радиометра усреднялись с учётом разницы уровней средней амплитуды к их общему среднему значению. Далее, данные, полученные в каждом из радиометров, усред-

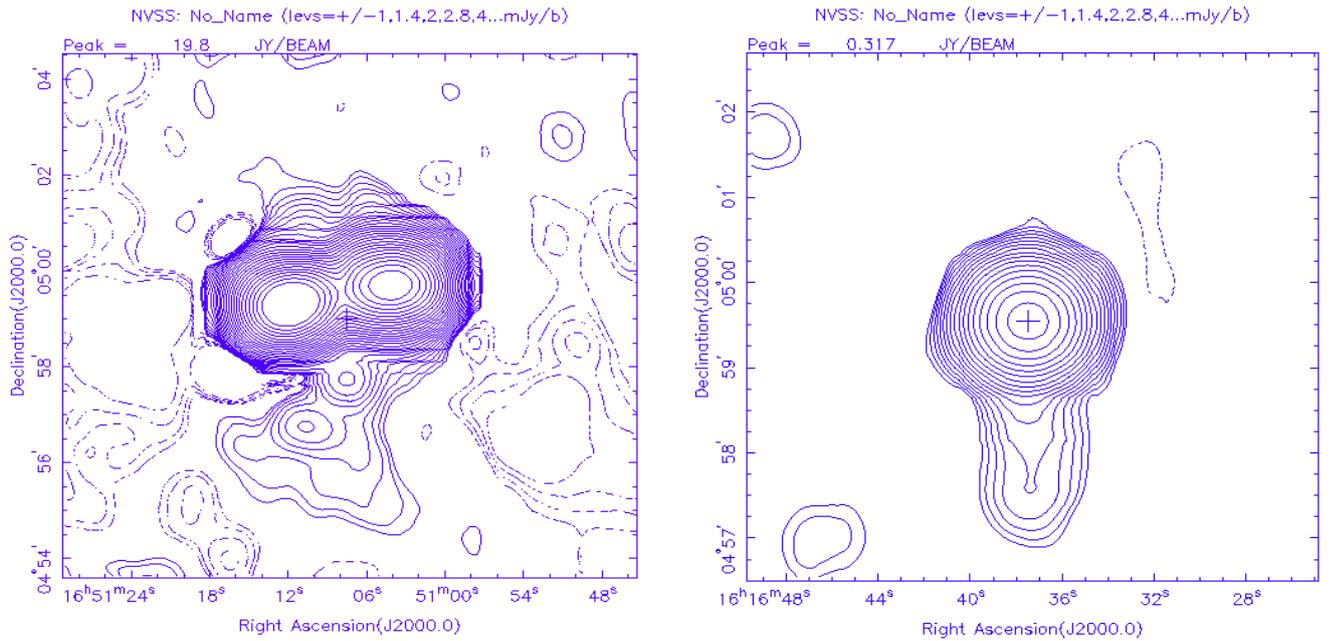


Рисунок 3.2 — Радиоизображение источников из NVSS обзора, полученные на интерферометре VLA: слева – калибровочного источника Геркулес А (3С 348), справа – исследуемого PKS 1614+051

нялись для получения средней кривой по всем радиометрам на 4.7 ГГц для получения максимального отношения сигнал/шум (S/N). Привязка между радиометрами проводилась с учетом абберационных потерь из-за смещения входных рупоров радиометров вдоль фокальной линии вторичного зеркала.

Для привязки данных использовался яркий калибровочный источник 3С 348 – радиогалактика Геркулес А (Рис. 3.2)¹. Источник является двойным и на Западном секторе РАТАН-600 при прохождении источника через ДН под позиционным углом $q \sim 46^\circ$ форма источника становится асимметричной, что учитывалось при его обработке. Амплитуда калибровочного источника определялась по его максимуму.

Спектральная плотность потока калибровочного источника была принята равной 27.3 Ян на частоте 2.3 ГГц и 12.6 Ян на частоте 4.7 ГГц [133]. Но поскольку частоты каналов на 4.7 ГГц были разные, как приведено в Таблице 9, то обработка была проведена для каждого канала и каждого радиометра по отдельности. После этого полученные значения спектральной плотности потока источника усреднялись.

¹(NASA, ESA, S. Baum and C. O’Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

Таблица 9 — Параметры калибровочного источника ЗС 348

Параметры / номер канала	1	2	3	4	5
Длина волны (λ , см)	6.09	6.28	6.49	6.70	13.3
Центральная частота (ν_0 , ГГц)	4.48	4.78	4.63	4.93	2.25
Плотность потока (S_ν , Ян)	12.0	12.4	12.8	13.3	27.3

На Рис. 3.3 приведены спектры источников из базы астрофизических каталогов CATS, калибровочного ЗС 348 (спектральный индекс, $\alpha = -1.1$) и исследуемого НФР PKS 1614+051. <https://www.cv.nrao.edu/nvss/postage.shtml>

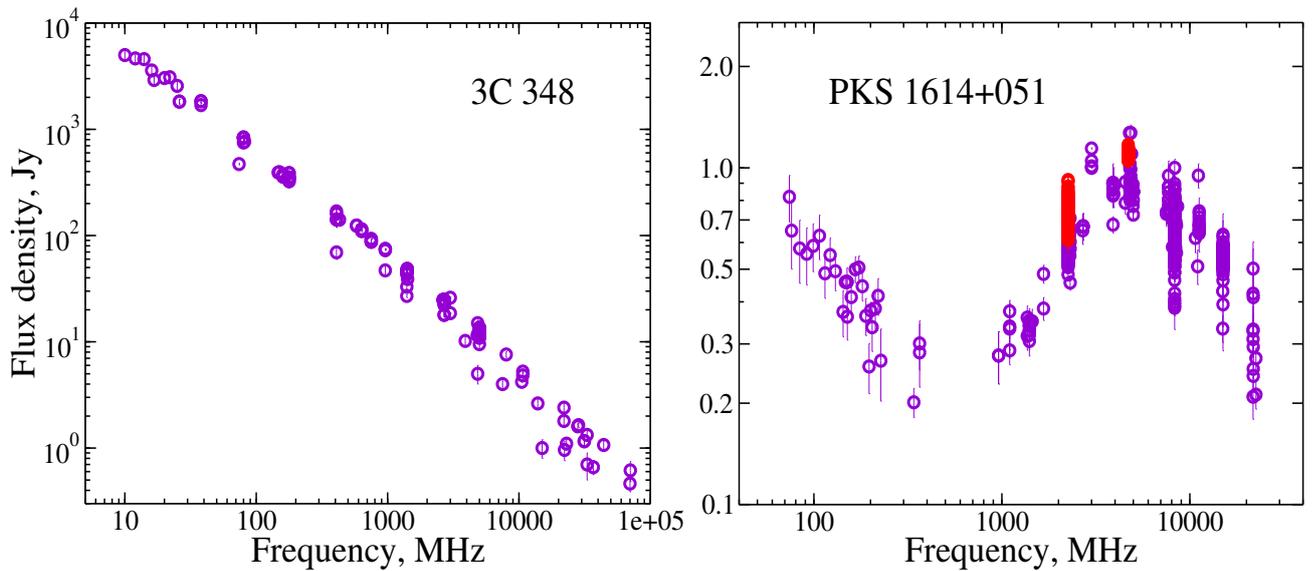


Рисунок 3.3 — Радиоспектры источников, построенные по литературным данным из CATS: слева – калибровочного источника ЗС 348, справа – исследуемого PKS 1614+051, где красные точки данные обзора

Обработка данных была проведена по каналам каждого радиометра. Для примера, на Рис. 3.5 и 3.6 приведены кривые за первый и второй циклы наблюдений калибровочного источника ЗС 348 по четырем каналам второго радиометра. С коэффициентом корреляции между ними 0.92 ± 0.01 в первом цикле наблюдений и 0.99 ± 0.00 , во втором. Ошибка одного измерения в среднем составила порядка 5%. Между одними и теми же каналами радиометров корреляция составила 0.78 ± 0.05 . Приведенная высокая корреляция в измерениях амплитуды источников в каналах радиометров позволяет после привязки ка-

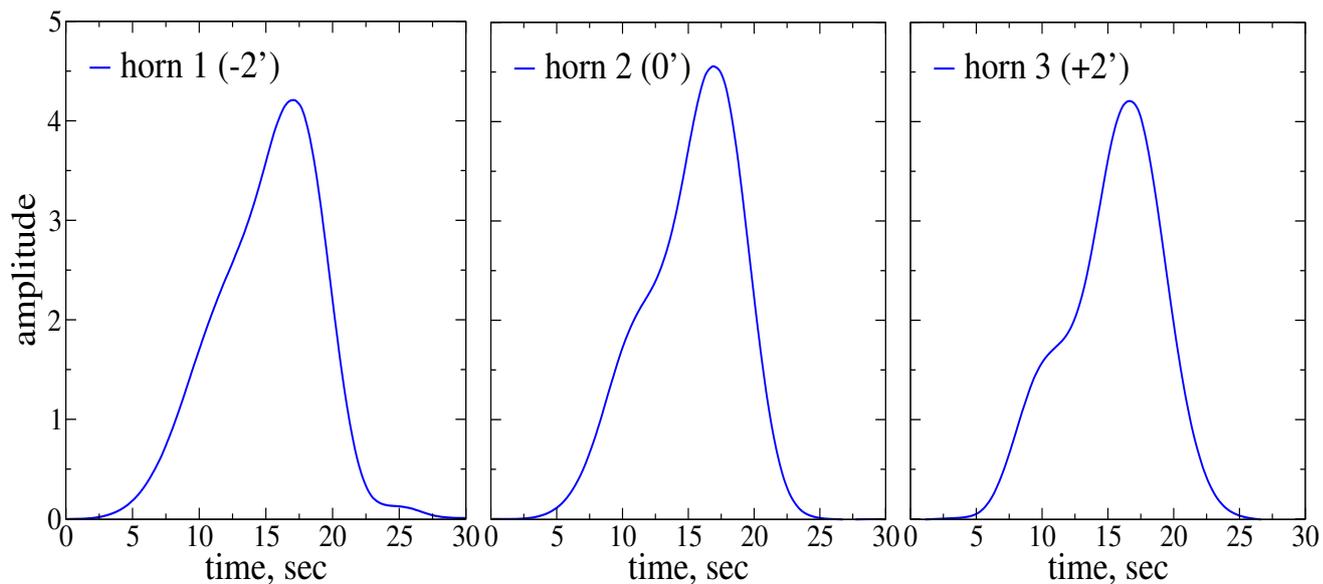


Рисунок 3.4 — Изменение формы кривой прохождения калибровочного источника 3С 348 из наблюдений в период времени 06–11.2019 на трехлучевом комплексе на 4.7 ГГц со смещением вдоль фокальной линии на $-2'2''$; $0'$; $+2'2''$

налов проводить их усреднение без потери сигнала, но с уменьшением уровня шума. В целом это позволяет более надежно получить результат по исследуемому источнику.

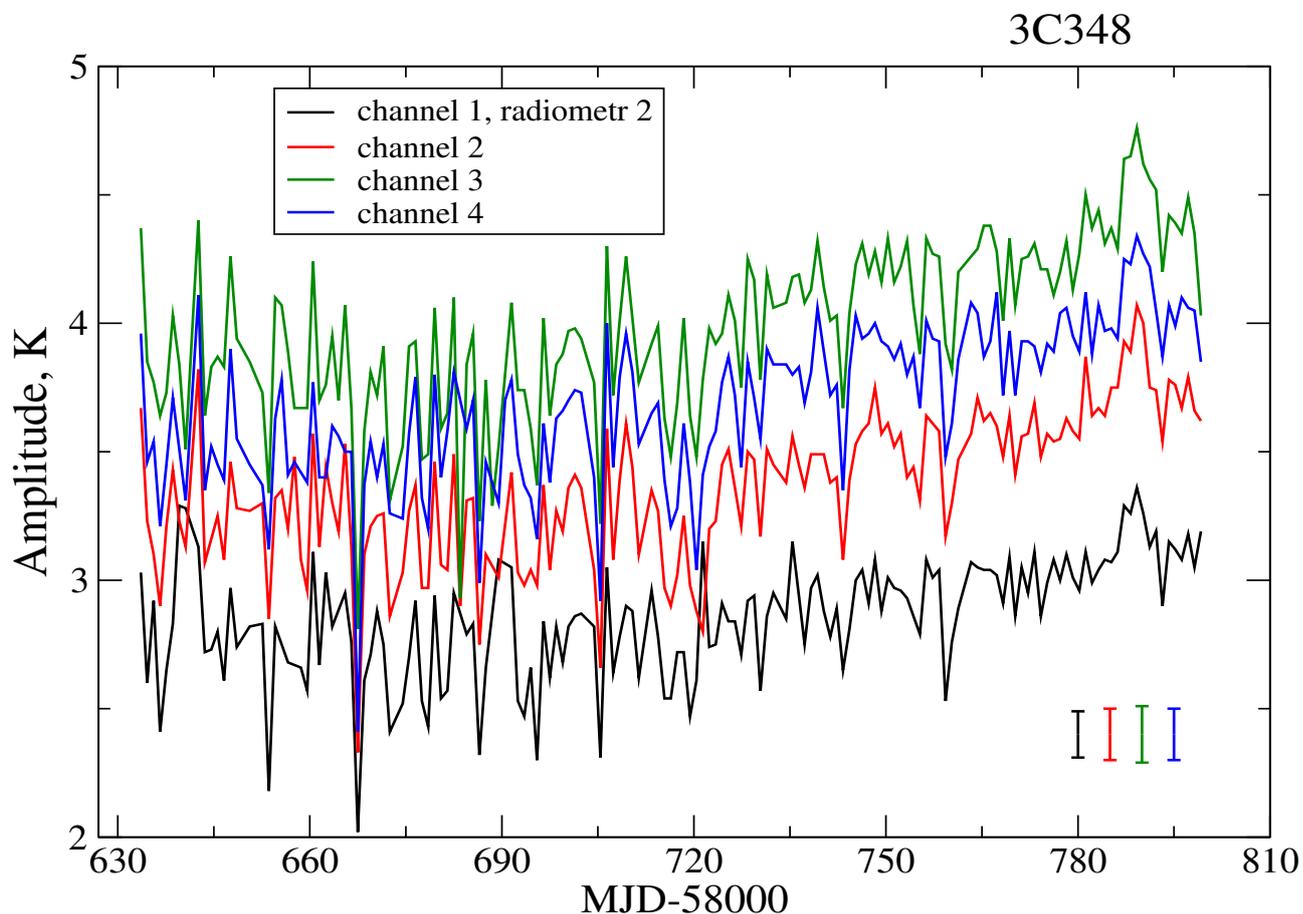


Рисунок 3.5 — Амплитуда 3C 348 на частоте 4.7 ГГц в период наблюдений с 29.05.2019 по 20.11.2019 гг., измеренная в каналах радиометра №2

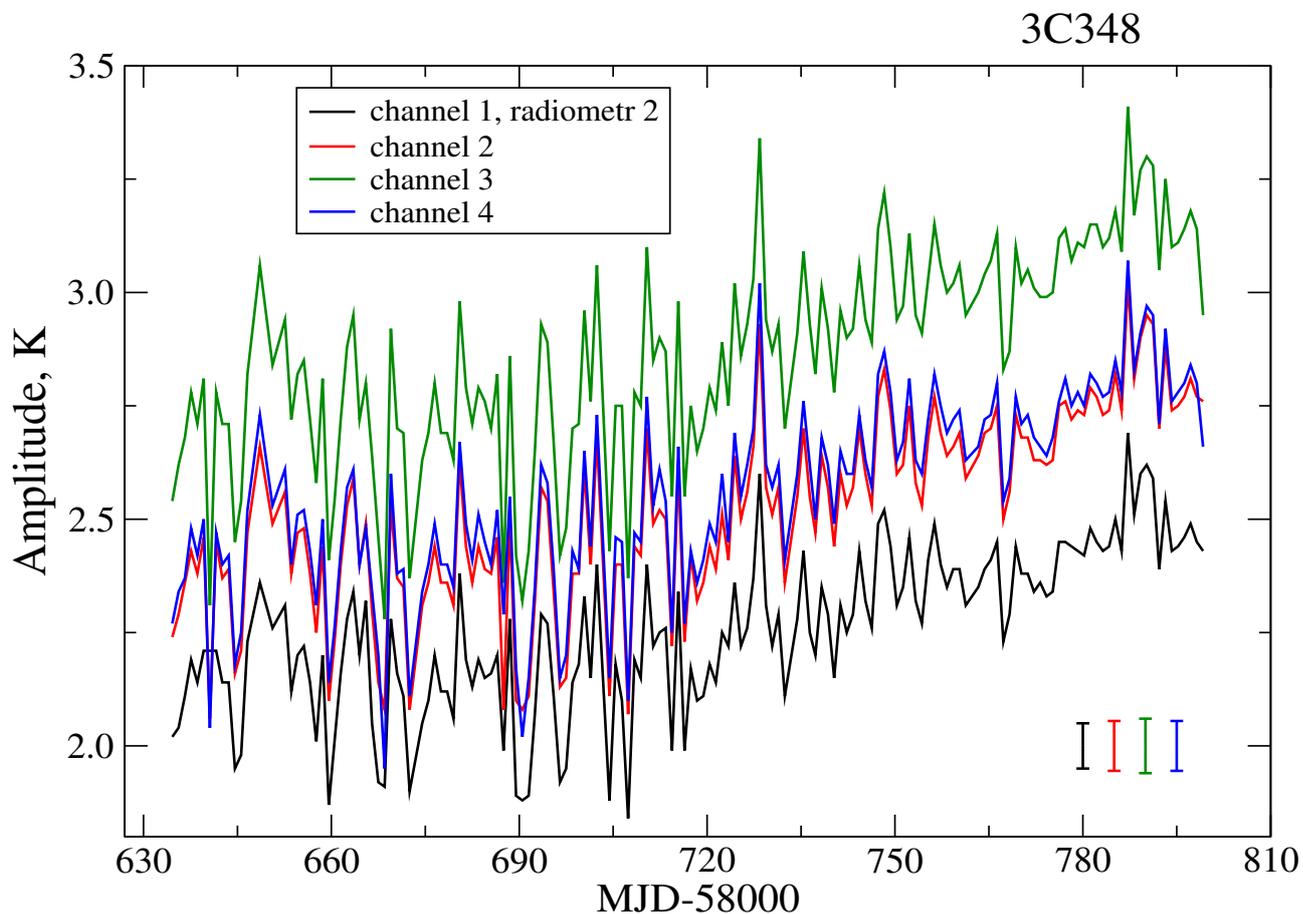


Рисунок 3.6 — Амплитуда калибровочного источника 3C 348 на частоте 4.7 ГГц в период наблюдений с 29.05.2019 по 20.11.2019 гг., измеренная в каналах радиометра №2

На Рис. 3.7 и 3.8 представлены кривые нормированной амплитуды для калибровочного источника 3C 348 (красная кривая) и для исследуемого PKS 1614+051 (синяя кривая). Кривые на верхнем рисунке получены в период времени 30.05.2019 – 20.11.2019 гг. при осреднении данных, полученных по каналам трех радиометров. Средняя относительная ошибка для первого цикла наблюдений на трех радиометрах, составила 1% и 1.3%, соответственно. Для второго цикла на четырех радиометрах, 0.7% и 1.0%. Кривые на нижнем рисунке получены в период времени 21.11.2019 – 08.06.2020 гг. при осреднении данных четырех радиометров.

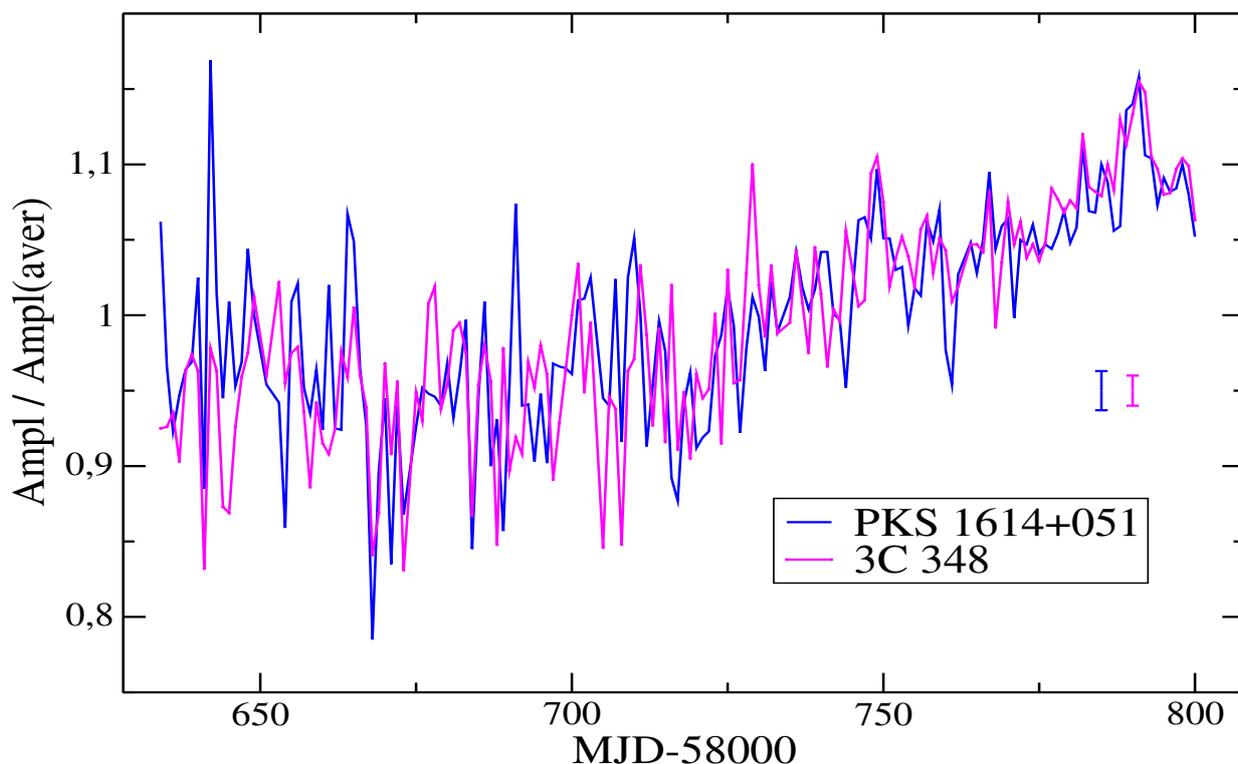


Рисунок 3.7 — Амплитуды источников, нормированные на средние значения с 30.05.2019 по 20.11.2019 гг., полученные при осреднении данных трёх радиометров. Красной линией обозначен калибровочный источник 3C 348, синей линией – исследуемый источник PKS 1614+051.

Можно видеть, что близость уровня кривых и всплесков на них связаны с изменением погодных условий – окружающей температуры за год наблюдений и, как следствие, изменение усиления радиоспектров. Коэффициент корреляции для первого цикла наблюдений между исследуемым и калибровочным источниками составил 0.74 ± 0.04 , для второго цикла наблюдений – 0.91 ± 0.01 , что указывает на высокую степень совпадений деталей на кривых.

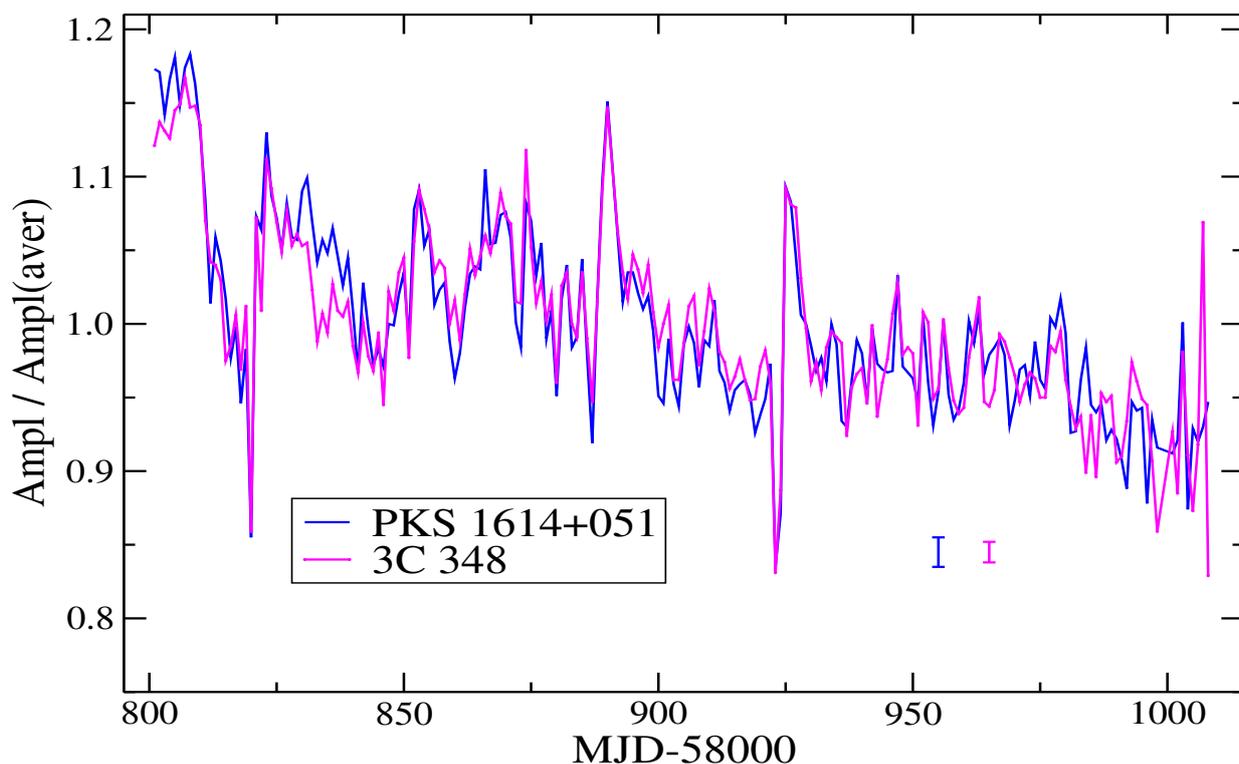


Рисунок 3.8 — Амплитуды источников, нормированные на средние значения с 21.11.2019 по 08.06.2020 гг., полученные при осреднении данных четырёх радиометров. Красной линией обозначен калибровочный источник 3C 348, синей линией – исследуемый источник PKS 1614+051.

Это позволяет кривую блеска исследуемого источника скорректировать по кривой калибровочного источника. Подробный анализ кривой блеска представлен ниже в этой главе.

На Рис. 3.9 показаны ежесуточные кривые прохождения исследуемого источника PKS 1614+051 через ДН за год наблюдений. Первичные записи наблюдений приведены для двух частот: слева – на частоте 2.3 ГГц, справа – на частоте 4.7 ГГц. На частоте 2.3 ГГц заметен высокий уровень шума на записях из-за помех во время наблюдений, на частоте 4.7 ГГц их сравнительно меньше.

На Рис. 3.10 показаны кривые прохождения источника PKS 1614+051 после ручной чистки от помех.

На Рис. 3.11 показаны кривые прохождения источника PKS 1614+051 после коррекции начала записей по расчетным эфемеридам и приведению к единой временной шкале. Эта процедура необходима при накоплении записей для повышения отношения сигнала к шуму (S/N) и повышения точности оценок амплитуды источника. Для записей на 2.3 ГГц накопление записей составило пять

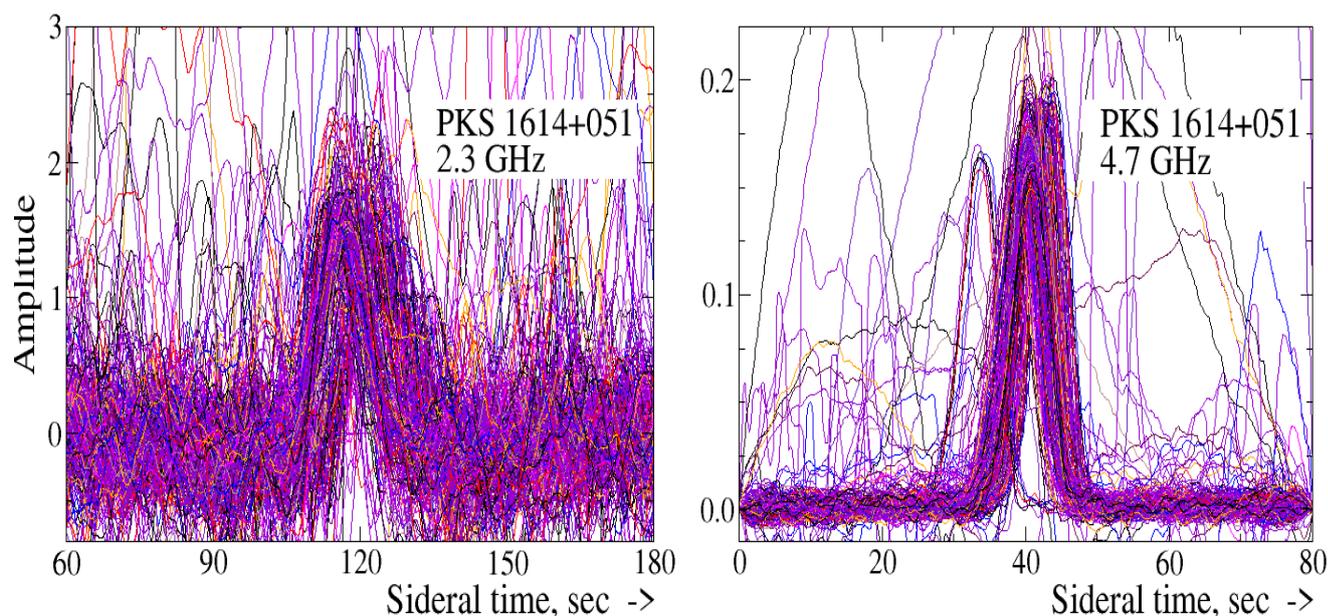


Рисунок 3.9 — Исходные ежесуточные кривые прохождения исследуемого источника PKS 1614+051. Слева — за год наблюдений на частоте 2.3 ГГц, справа — на частоте 4.7 ГГц

дней для повышения S/N . На 4.7 ГГц накопление составило три дня, прежде всего для повышения точности измерений.

В Таблице 10 приведены средние параметры источника PKS 1614+051 полученные за год каждодневных наблюдений (в таблице помечены как 1d) и наблюдений с усреднением записей по 3 и 5 дней (помечены, как 3d, 5d), на частоте 2.3 ГГц и 4.7 ГГц. На более низкой частоте 2.3 ГГц максимальное улучшение по отношению амплитуды источника к измеренному средне-квадратичному отклонению (СКО) величины шума достигается при усреднении по пяти дням, соответственно, наибольшим значением сигнал/шум. Это увеличение в два раза связано с относительно низкой точностью определения параметров источника из-за низкого изначального значения сигнал/шум и большого числа помех относительно частоты на 4.7 ГГц. На частоте 4.7 ГГц достаточное улучшение достигается уже при трехдневном усреднении. При каждодневных наблюдениях на обеих частотах наблюдается избыточный шум связанный с относительно невысокой точностью измерений связанной с отсутствием калибровок записей, но при усреднении записей повышается не только точность параметров источника, но и происходит потеря информации. Однако в данной задаче по определению параметров источника PKS 1614+051 это не является основной проблемой.

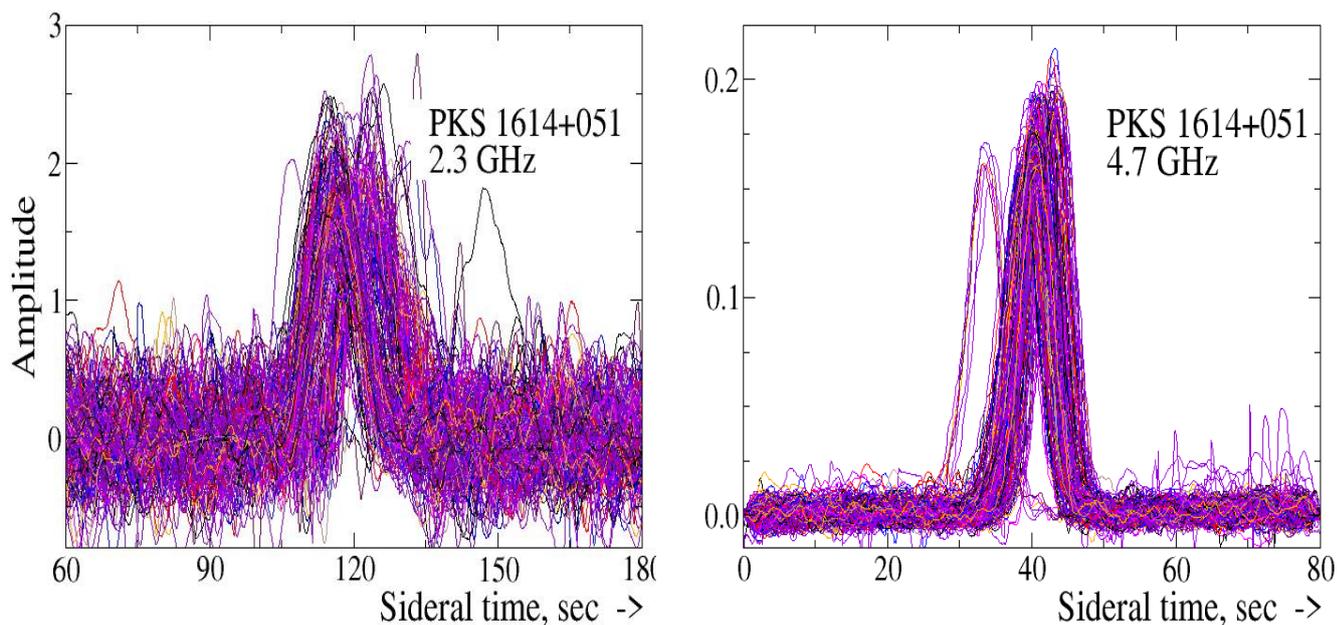


Рисунок 3.10 — Ежесуточные кривые прохождения источника PKS 1614+051 после чистки от помех. Слева – на частоте 2.3 ГГц, справа – на частоте 4.7 ГГц

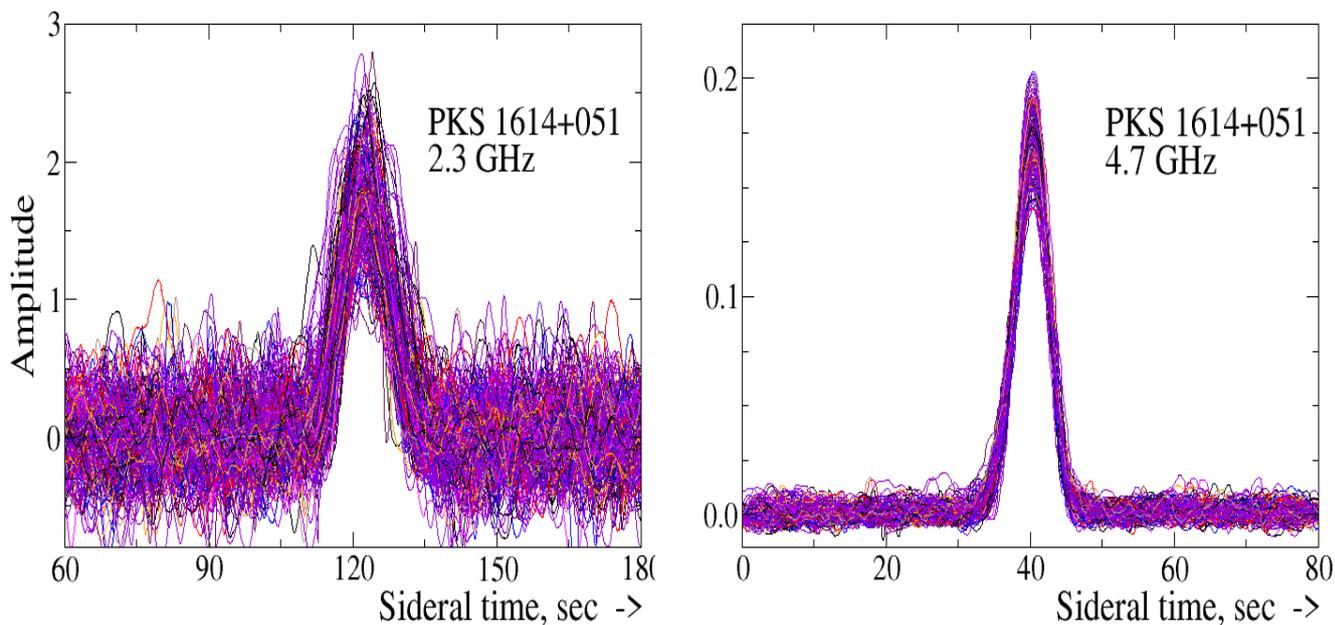


Рисунок 3.11 — Записи наблюдений источника PKS 1614+051 после коррекции по времени. Слева – на частоте 2.3 ГГц, справа – на частоте 4.7 ГГц

Калибровка данных проводилась отдельно для этих двух периодов. Данные усреднялись в каналах каждого радиометра с учётом разницы уровней

Таблица 10 — Средние параметры источника PKS 1614+051 за год наблюдений

Параметр накопление	1d	3d	5d	ν , ГГц
Число наблюдений, дней	239	80	48	2.3
Амплитуда, мК	1716±292	1672±186	1669±169	2.3
Дисперсия шума, мК	169±51	104±28	79±17	2.3
Сигнал/шум (S/N)	11±5	17±5	22±5	2.3
Полуширина, сек	12.2±2.6	11.9±1.5	11.7±1.1	2.3
Число наблюдений, дней	352	115	69	4.7
Амплитуда, мК	170±13	170±10	169±8	4.7
Дисперсия шума, мК	2.7±2.1	1.4±0.3	1.1±0.2	4.7
Сигнал/шум (S/N)	72±22	123±26	156±33	4.7
Полуширина, сек	5.8±0.5	5.8±0.3	5.8±0.3	4.7

антенной температуры. Далее, данные, полученные в каждом из радиометров усреднялись для получения средней кривой блеска с наибольшей точностью по антенной температуре.

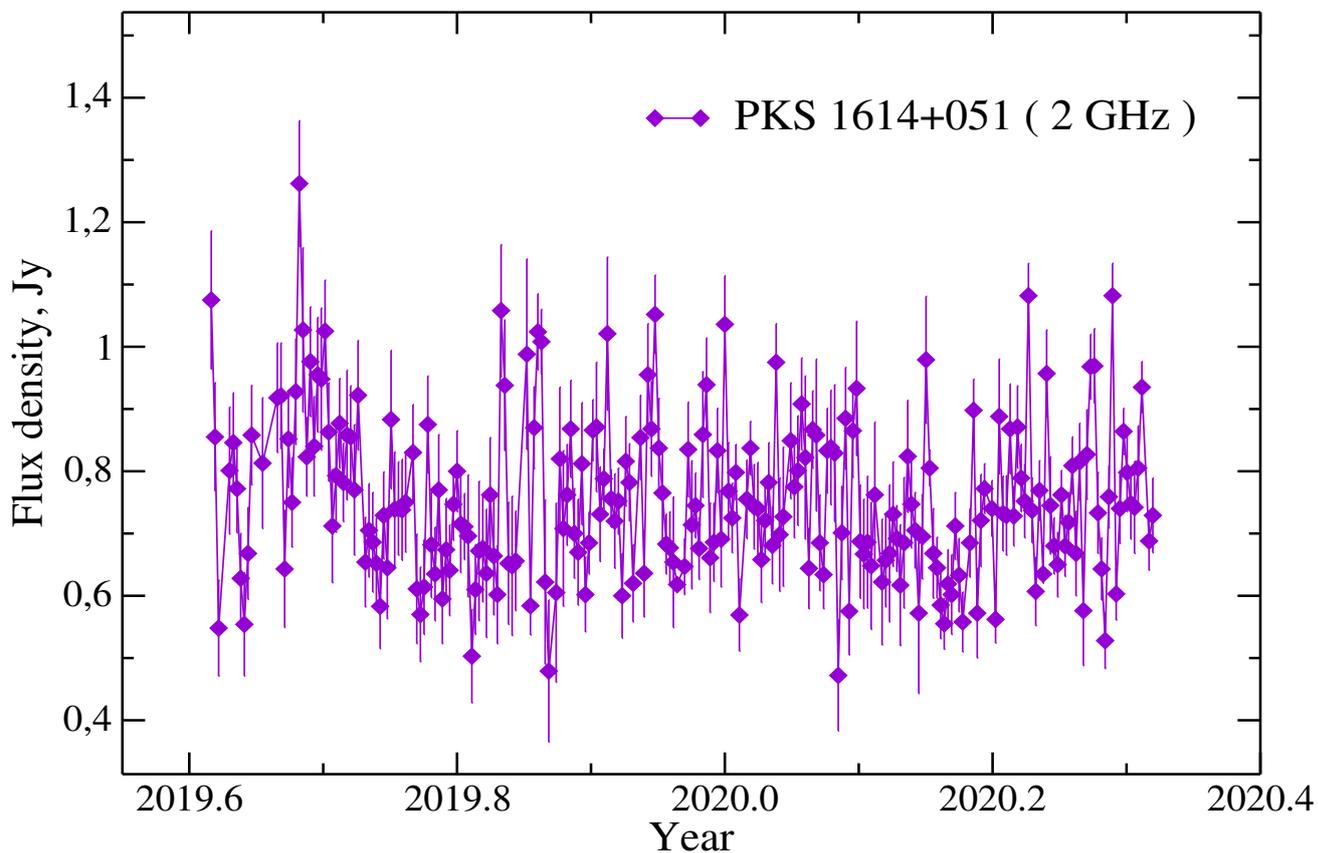


Рисунок 3.12 — Кривая блеска источника PKS 1614+051 на частоте 2.3 ГГц при ежедневных наблюдениях в период с 13.08.2019 по 26.04.2020 гг.

3.4 Анализ кривой блеска PKS 1614+051

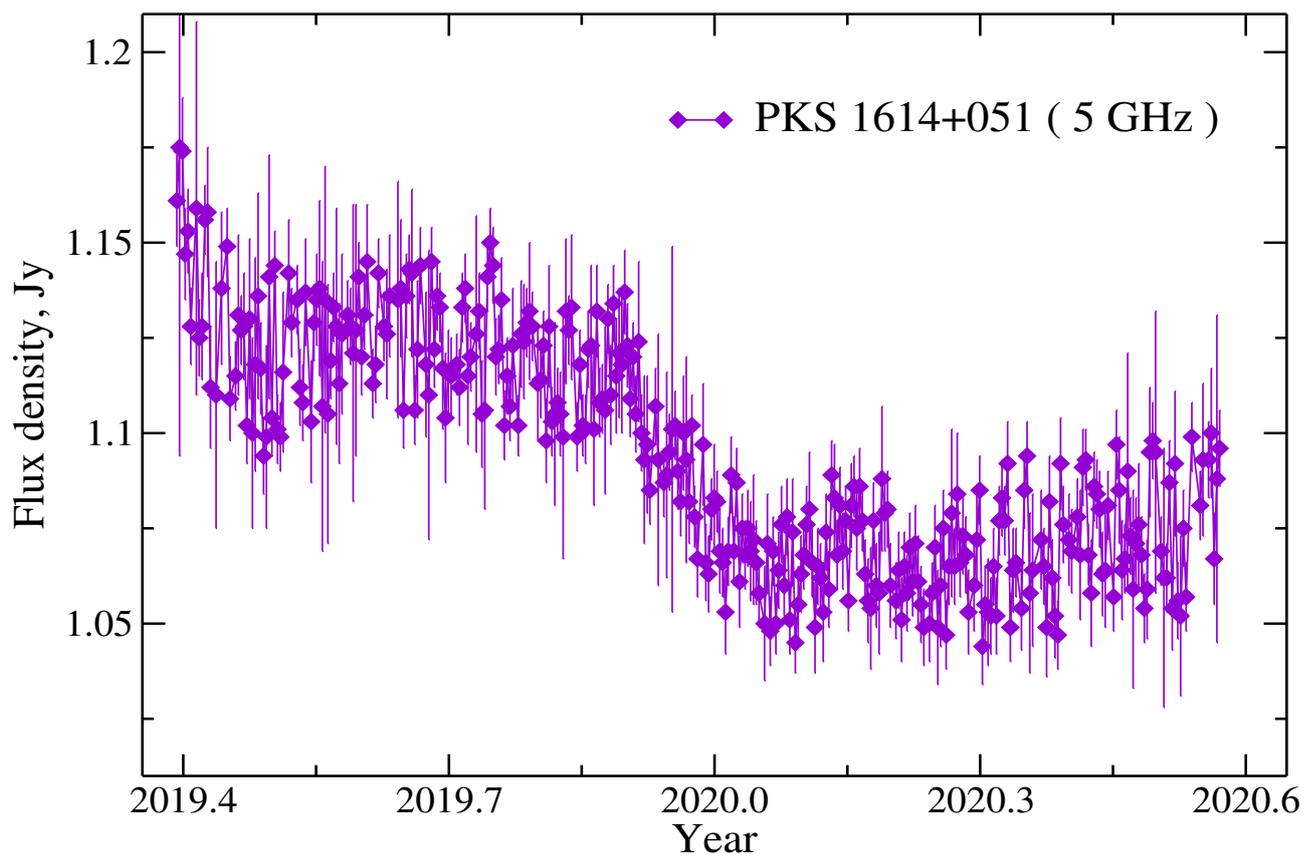


Рисунок 3.13 — Кривая блеска источника PKS 1614+051 на частоте 4.7 ГГц

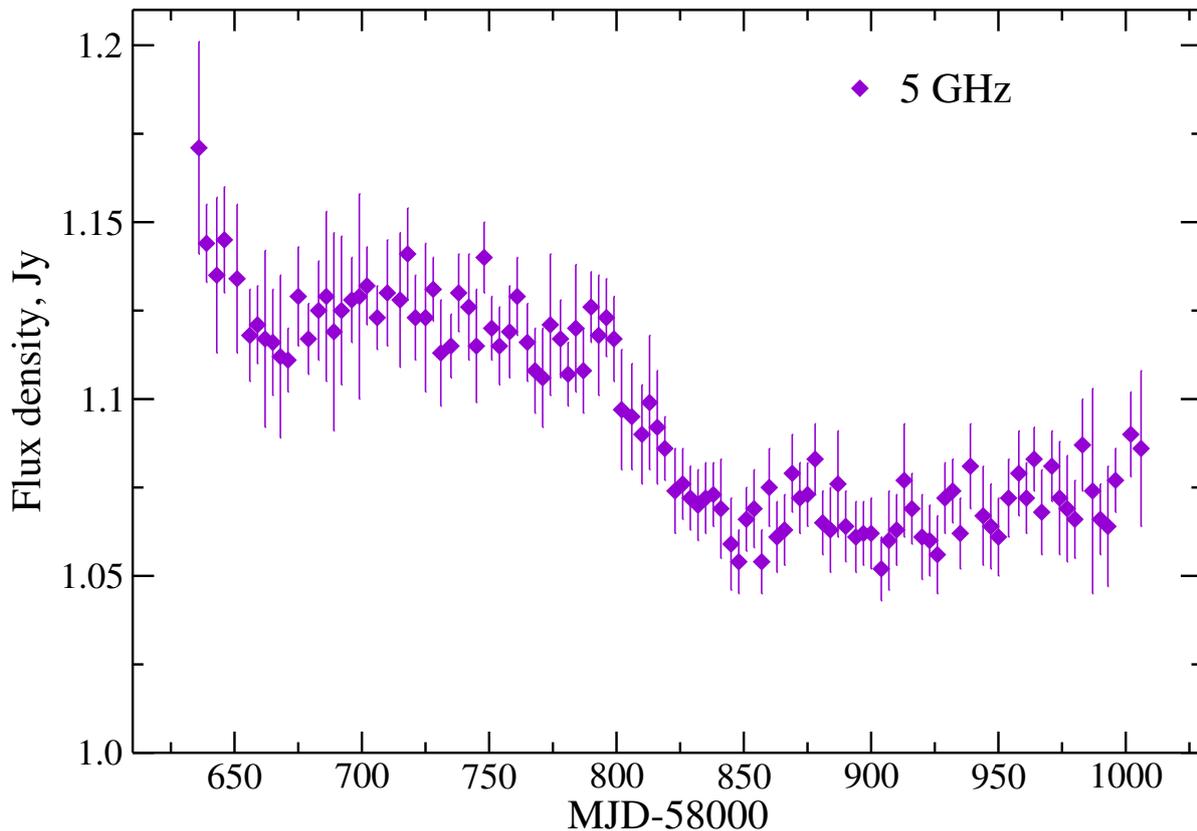


Рисунок 3.14 — Кривая блеска для PKS 1614+051 при трехдневном усреднении из наблюдений на Западном секторе РАТАН-600, проведённых с мая 2019 г. по июнь 2020 гг. на частоте 4.7 ГГц.

На Рис. 3.12 представлены кривые блеска ежедневных наблюдений источника PKS 1614+051 в Ян на частоте 2.3 ГГц в период времени с 13.08.2019 по 26.04.2020 гг. и Рис. 3.13 на частоте 4.7 ГГц с 30.05.2019 по 08.06.2020 гг. Несмотря на то, что данные на 4.7 ГГц были получены с осреднением по всем радиометрам, средняя ошибка составила около 2% и на 2.3 ГГц 10%. Для повышения точности было проведено усреднение по каждому трем дням на частоте 4.7 ГГц и по пяти дням на частоте 2.3 ГГц.

Всего данные содержат 337 дней наблюдений. На Рис. 3.14 приведены значения плотности потока на $S_{4.7}$ с трехдневным усреднением. Среднее значение спектральной плотности потока составило 1.1 Ян со стандартным отклонением 0.03 Ян на 4.7 ГГц. На Рис. 3.15 приведены данные по плотности потока на частоте 2.3 ГГц, полученные в период времени 13.08.2019–26.04.2020 гг. Данные получены с усреднением по пять дней для повышения точности результата. Среднее значение спектральной плотности потока составило 1.1 Ян со стандартным отклонением 0.03 Ян.

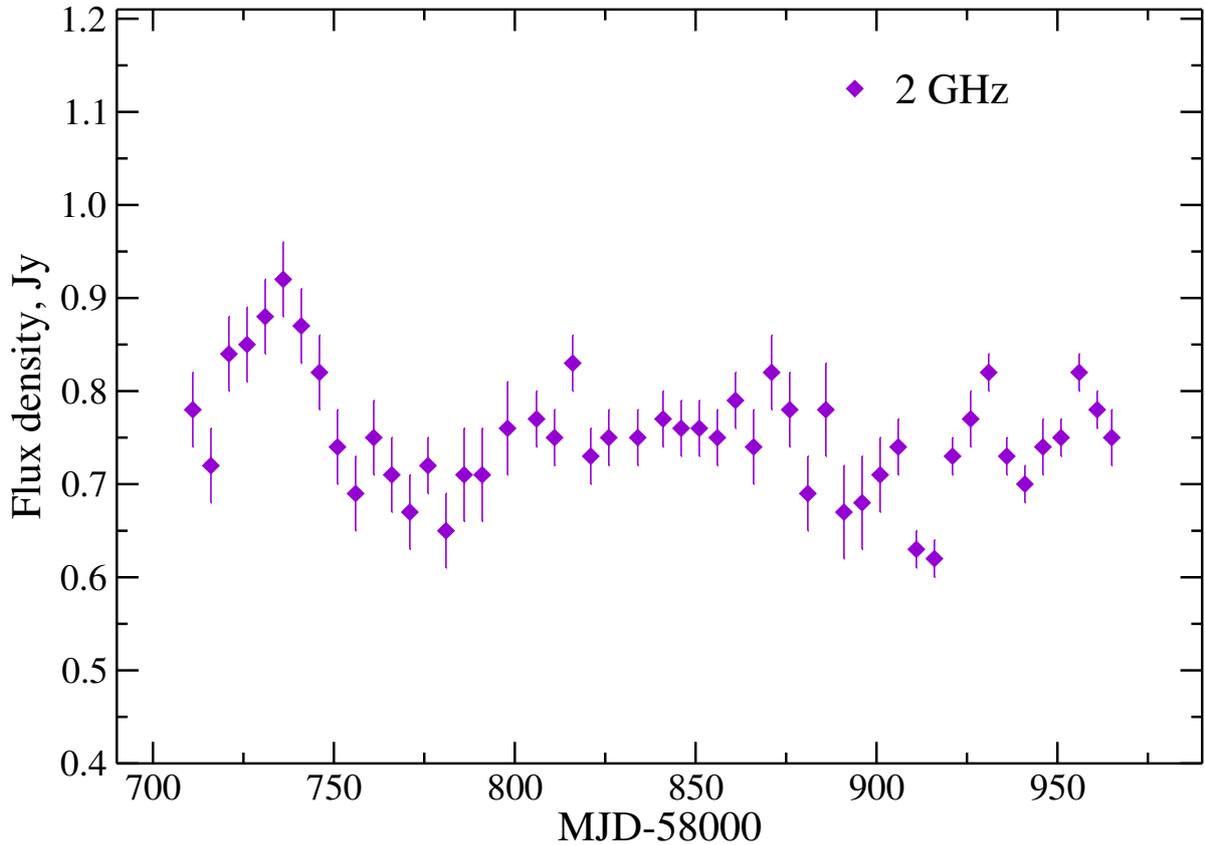


Рисунок 3.15 — Кривая блеска PKS 1614+051 с пятидневным усреднением из наблюдений на Западном секторе РАТАН-600, проведённых с мая 2019 г. по июнь 2020 гг. на частоте 2.3 ГГц.

Средние эпохи наблюдений (гггг.мм.дд и гггг.гг), значения спектральной плотности потока на 4.7 ГГц и их ошибки представлены в Таблице ?? Приложения. Аналогично представлены данные на 2.3 ГГц в Таблице ?? Приложения

Подробности проведения наблюдений и обработки данных описаны выше, а также в [57; 63].

3.4.1 Оценка уровня переменности PKS 1614+051

Уровень переменности кривой блеска на 4.7 ГГц достаточно мал: $V_S = 0.02 \pm 0.001$, $F_{\text{var}} = 0.02 \pm 0.001$, $M = 0.03$. Аналогично для кривой блеска на частоте 2.3 ГГц: $V_S = 0.04 \pm 0.02$, $F_{\text{var}} = 0.03 \pm 0.002$, $M = 0.03$.

Структурная функция (СФ) первого порядка была рассчитана для двух разных случаев. Первый случай — для исходных данных (Рис. 3.14, слева), вто-

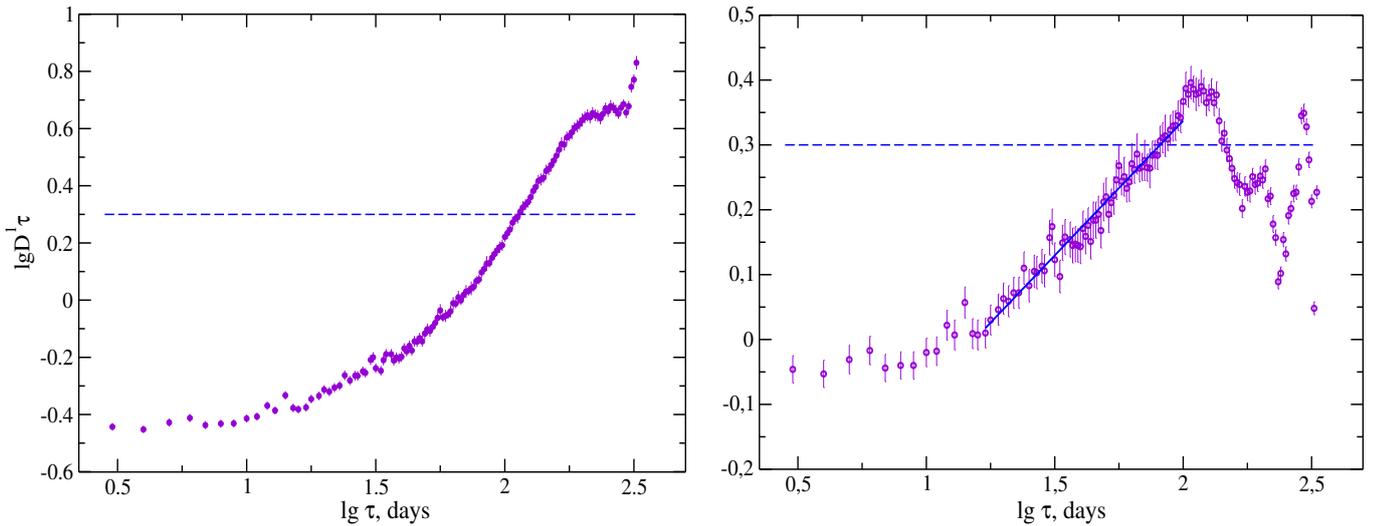


Рисунок 3.16 — Структурная функция кривой блеска PKS 1614+051 из ежедневных наблюдений на РАТАН-600 в 2019 – 2020 гг. на частоте 4.7 ГГц.

Слева – исходные данные, справа – с вычтенным линейным трендом

рой – для кривой блеска после вычитания тренда (Рис. 3.14, справа), чтобы исключить тренд долговременной переменности. Начальный шаг по времени τ был равен одному дню в обоих случаях. СФ для начальной кривой блеска не достигает второго плато, что означает масштабы переменности больше, чем время наблюдения PKS 1614+051. Для данных после вычитания долговременного линейного тренда СФ показывает плато $\tau_{\text{obs}} \sim 100$ (или 25 дней в системе источника). Согласно [74], наклон СФ $b < 1$ характеризует процесс состоящий из фликер-шума и шума случайного блуждания (процесс длится произвольное время).

С целью поиска периодичности сигнала на масштабе суток была вычислена периодограмма Ломба-Скаргла [134; 135]. Расчёты были выполнены с помощью модуля Python GLS, разработанного [136]. Периодограмма Ломба-Скаргла на частоте 4.7 ГГц не обнаруживает никаких значимых пиков с $\text{FAP} \leq 1\%$ как для случая исходных данных, так и для случая данных с вычтенным трендом.

Переменность блазара PKS 1614+051 на масштабе 43 лет оценена в работе [132]. Индекс переменности на 4.7 оценён как $V_S=0.26$, что говорит в целом о его малой переменности на историческом масштабе наблюдений.

3.5 Влияние мерцаний межзвездной среды на уровень обнаруженной переменности

Для учета влияния межзвёздной среды на уровень переменности плотности потока излучения была выполнена оценка возможного вклада межзвёздных мерцаний по модели *ТС 93*, описанной в работе [137].

Межзвёздные мерцания делятся на рефракционные и рассеивающие. Так как не существует зафиксированных примеров дифракционного мерцания внегалактических источников [137], данный вид мерцаний далее рассматриваться не будет.

Рефракционное рассеяние рассматривается в двух разных режимах: в режиме сильного и слабого рассеяния. При слабом рассеянии наблюдаются лишь небольшие фазовые изменения, вносимые ISM в первую зону Френеля. При сильном рассеянии волновой фронт сильно искажается на масштабах, меньших, чем первая зона Френеля. Эти два режима демонстрируют качественно различное влияние на проходящее через них радиоизлучение. Основные параметры, которые учитывает модель: ξ - сила рассеяния, ν_0 -частота перехода, при которой $\xi = 1$ (неоднородности ISM приводят к фазовым изменениям порядка половины радиана в первой зоне Френеля, θ_F - угловой размер первой зоны Френеля, t_F - время для прохождения первой зоны Френеля.)

Для этого использовался пакет на языке программирования Python *RISS19*² [138]. *PKS 1614+051* имеет галактические координаты $b = 18.05$ и $l = +36.45$. Переходная частота для координат *PKS 1614+051* составляет 3.42 ГГц. Таким образом, на частоте 2.3 ГГц реализуется режим сильного рассеяния, а на 4.7 ГГц режим слабого рассеяния. Размер первой зоны Френеля $\theta_F = 0.03$ mas. Учет конечных размеров источника приводит к уменьшению m и увеличению t . Для оценки максимально возможного вклада *RISS* в наблюдаемый уровень переменности в качестве приближения для размера источника был выбран минимальный размер стационарного синхротронного радиоисточника [139]: $\theta_s = \theta_{\min} = 0.6 \times \sqrt{S}/\nu$ В качестве S было использовано медианное значение спектральной плотности потока за время наблюдений.

²<https://github.com/PaulHancock/RISS19>

Для точечного источника отношение между частотой наблюдения и переходной частотой определяет уровень модуляции m спектральной плотности потока и её временной масштаб t в указанных двух режимах согласно формулам из [137]

Для медианной спектральной плотности потока на частоте 4.7 ГГц $\theta_{\min} = 0.13$ mas. Уровень модуляции плотности потока m примерно 2% для размера источника $\theta_s = 4 \times \theta_{\min} = 0.52$ mas, что означает доминирующий вклад RISS, и около 1% для $\theta_s = 8 \times \theta_{\min} = 1.04$ mas в случае вклада RISS сравнимого со внутренней переменностью.

Для медианной спектральной плотности потока на частоте 2.3 ГГц $\theta_{\min} = 0.27$ mas. Уровень модуляции плотности потока m примерно 4% для размера источника $\theta_s = 4 \times \theta_{\min} = 1.08$ mas, что означает доминирующий вклад RISS, и около 2% для $\theta_s = 8 \times \theta_{\min} = 2.08$ mas в случае вклада RISS сравнимого со внутренней переменностью.

Учитывая, что временные масштабы t для RISS около 1–3 дней, в соответствии с вышеуказанными предположениями, они не могут быть сглажены за время наблюдения на РАТАН-600 (несколько минут). Размер источника $\theta_s = 0.5$ – 1.0 mas на 2 и 5 ГГц сопоставим с размерами PKS 1614+051 по данным РСДБ [140; 141].

Можно сделать вывод, что эффекты RISS могут быть существенными для ежедневных наблюдений PKS 1614+051 на 4.7 и 2.3 ГГц.

3.6 Выводы главы 4

1. Измерены спектральные плотности потока радиоизлучения НФР блазара PKS 1614+051 на частотах 2.3 и 4.7 ГГц в период 2019-2020 гг. Общее число измерений – 337. Измерения сделаны в режиме обзора на фиксированной высоте Западного сектора РАТАН-600, калибровка по спектральной плотности потока проведена с использованием радиоисточника 3С 348. Средняя ошибка измерений составляет 3% и 7% при усреднении данных по 3 и 5 дней, соответственно.

2. Кривая блеска демонстрирует медленное уменьшение спектральной плотности потока в период 2019–2020 гг. Максимальная спектральная плот-

ность потока составила 1.18 ± 0.08 Ян, минимальная – 1.04 ± 0.01 Ян. Ежедневные наблюдения выявили невысокий уровень переменности спектральной плотности потока на обеих частотах: на 4.7 ГГц индекс переменности $V_S = 0.02 \pm 0.001$, фракционная переменность $F_{\text{var}} = 0.02 \pm 0.001$ и индекс модуляции $M = 0.03$. На частоте 2.3 ГГц: $V_S = 0.04 \pm 0.02$, $F_{\text{var}} = 0.03 \pm 0.03 \pm 0.002$ и $M = 0.03$. Однако влияние межзвёздных мерцаний является существенным и сравнимым с уровнем модуляции спектральной плотности потока. Временной масштаб переменности радиоизлучения в системе наблюдателя $\tau_{\text{obs}} = 100$ дней, что соответствует 25 дням в системе источника и размер области излучения $R \ll 1$

3. Периодограмма Ломба–Скаргла на частоте 2.3 и 5 ГГц не обнаруживает значимых пиков ($\text{FAP} \geq 1\%$) как для случая исходных данных, так и для случая данных с вычтенным трендом.

Глава 4. Суточная переменность радиоизлучения блазара АО 0235+164

4.1 Блазар АО 0235+164

АО 0235+164 является ярким экстремально компактным блазаром [52—54] с красным смещением $z = 0.94$ [55]. Его излучение детектируется во всём электромагнитном спектре, включая γ -диапазон [49; 142—144], что делает его подходящим кандидатом для исследования переменности излучения во всём электромагнитном диапазоне спектра. На рисунке 4.1 по данным с помощью инструмента *SED Builder* центра космических данных SSCC¹ показано спектральное распределение энергии для блазара АО 0235+164 во всём диапазоне длин волн с двумя характерными для блазаров пиками.

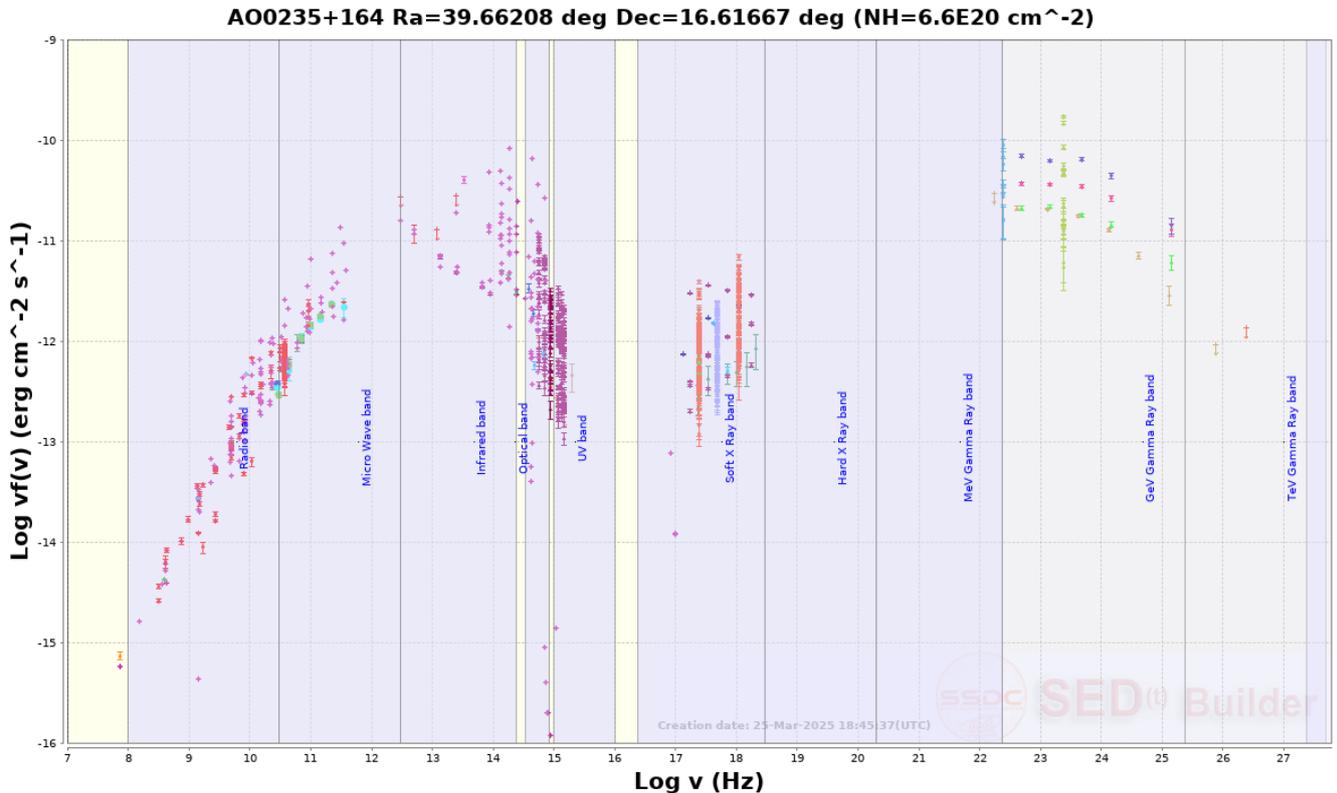


Рисунок 4.1 — Спектральное распределение энергии для блазара АО 0235+164, построенное с помощью *SED Builder*, во всём диапазоне длин волн с двумя характерными для блазаров пиками.

¹<https://tools.ssdsc.asi.it/SED>

Радиоинтерферометрические наблюдения показывают его чрезвычайную компактность, составляющую $\leq 0.5 \text{ mas}$ со сверхсветовыми видимыми скоростями $\sim 30c$ [145] и с предполагаемым широким видимым углом раскрытия струи $\sim 50^\circ$ в пределах примерно 0.5 mas от ядра [146–148]. Компактность и яркость объекта сочетаются с небольшим углом между джетом и лучом зрения $\Theta = 1.7^\circ$ [149], что указывает на геометрию, удачную для наблюдения за активностью джета источника [150]. Джет АО 0235+164 претерпевает значительные изменения во времени, что отличает его от большинства других блазаров [151].

Анализ корреляции между переменностью оптического излучения и γ -излучения указывает на тесную взаимосвязь излучающих областей, подчеркивая взаимодействие между различными компонентами излучения [152]. В работе [153] показано, что области γ -излучения и оптического примерно одинаковы и расположены примерно на расстоянии 6.6 пк от центральной области излучения на частоте 15 ГГц .

Для АО 0235+164 были обнаружены признаки квазипериодичности кривых блеска в оптическом и радиодиапазонах [154; 155]. Ряд работ указывает на потенциальную квазипериодичность кривой блеска в R- фильтре оптического диапазона с периодом ~ 8.2 года [156–158]. Квазипериодичное поведение плотности потока на кривых блеска указывает на возможное наличие в центральной машине АЯГ двойной системы сверхмассивных чёрных дыр [159; 160]. А анализ на частоте 37 ГГц позволил предположить существование тесной двойной системы СМЧД с примерно одинаковыми массами около $10^{10} M_\odot$ [161].

По результатам РСДБ наблюдений с помощью системы VLBA у блазара АО 0235+164 не было обнаружено протяжённой структуры на масштабах порядка одного парсека [148].

На масштабах килопарсек АО 0235+164 по наблюдениям на радиоинтерферометре VLA на частотах 1.4 и 5 ГГц в направлении на северо-запад от компактного ядра детектируется слабая протяжённая составляющая [55; 162]. Эти факты могут свидетельствовать о чрезвычайно малом угле наклона джета относительно луча зрения [163].

Блазар АО 0235+164 демонстрирует экстремальную переменность нетеплового излучения, превышающую порядок величины во временных масштабах менее 1 года во всех спектральных диапазонах. Переменность АО 0235+164 в течение четырех десятилетий изучалась от радио до γ -диапазона. Характерное

время переменности варьируется от менее чем часа до нескольких лет [155; 161; 164–169]. Данный объект был объектом нескольких кампаний телескопа Whole Earth Blazar Telescope (WEBT) [154; 170; 171] и фигурировал в программе поддержки GLAST-AGILE (GASP) [168].

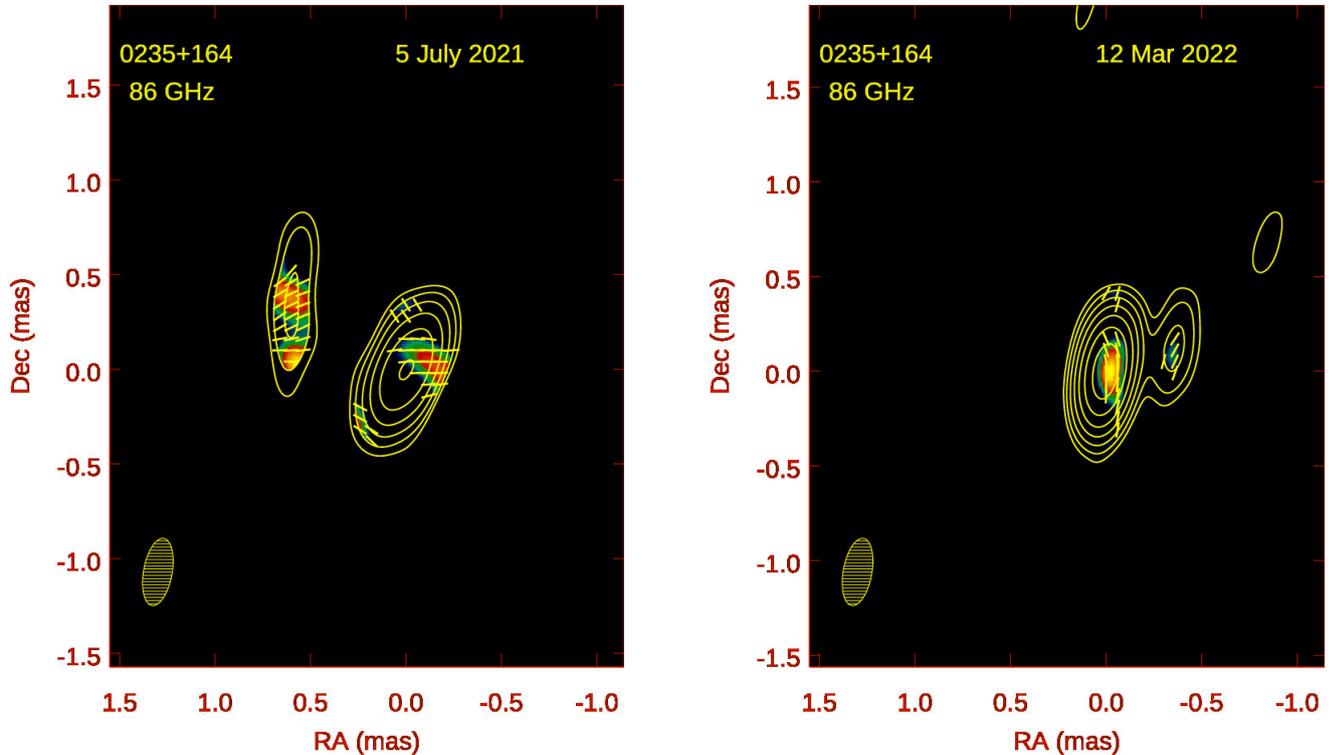


Рисунок 4.2 — VLBA изображения АО 0235+164 (заимствованы из https://www.bu.edu/blazars/VLBA_GLAST/0235.html) на частоте 86 ГГц и полученные во время проведения обзора на Западном секторе РАТАН-600.

На Рис. 4.3(слева) показан радиоспектр источника АО 0235+164 (J023838+163658). Синие точки - литературные данные из базы данных CATS, красные - данные на 2.3 и 4.7 ГГц, полученные на Западном секторе РАТАН-600. Гистограмма распределения спектральных индексов $\alpha_{2.3-4.7}$ за год наблюдений показана на Рис. 4.3(справа). Видно и по рисунку, и на гистограмме, что спектр источника инвертированный ($\alpha_{2.3-4.7} > 0$, $\alpha_{avr} = 0.3$). На Рис. 4.3 показаны радиоспектры калибровочных источников – PKS 0316+16 (J031857+162833, рисунок слева) и ЗС 138 (052109+163822, справа) по литературным данным. Близость положения этих источников с крутыми спектрами, соответственно $\alpha_{PKS} = -0.98$ и $\alpha_{ЗС138} = -0.73$, к АО 0235+164 позволило сделать ежесуточную привязку по амплитуде этого источника. Это связано с тем, что изменение температуры окружающей среды влияло сходным образом на усиление радиометров этих источников.

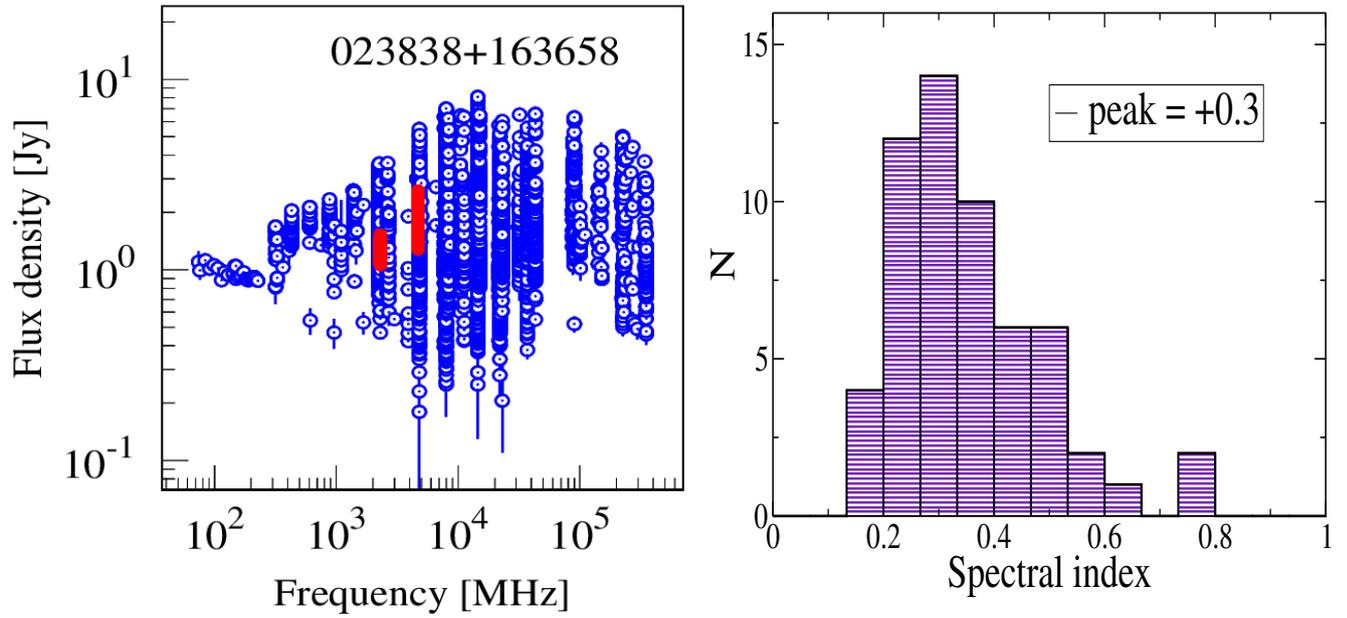


Рисунок 4.3 — Слева: радиоспектр источника АО 0235+164 (J023838+163658). Синие точки - литературные данные, красные - данные РАТАН-600 на 2.3 и 4.7 ГГц. Справа: гистограмма распределения спектральных индексов $\alpha_{2.3-4.7}$ за год наблюдений

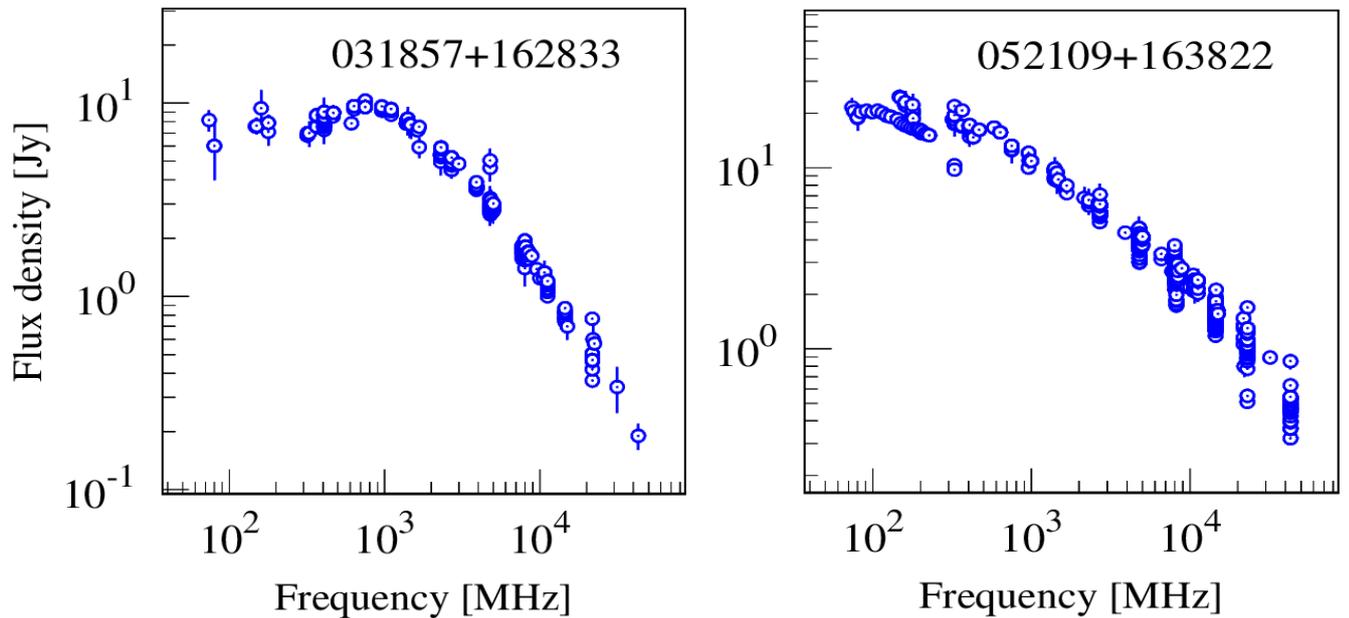


Рисунок 4.4 — Радиоспектры калибровочных источников. Слева: PKS 0316+16 (J031857+162833); справа: 3C 138 (052109+163822) по литературным данным

Целью исследования АО 0235+164 в рамках настоящей работы является определение свойств переменности радиоизлучения на коротких временных масштабах - порядка суток, на масштабах года.

4.2 Ежедневные наблюдения блазара АО 0235+164 на РАТАН-600

Блазар АО 0235+164 наблюдался на Западном секторе РАТАН-600 в обзоре неба со вторичным зеркалом «Облучатель № 5» на склонении калибровочного источника ЗС 138. Наблюдения проводились на частоте 2.3 и 4.7 ГГц ежедневно с мая 2021 по июнь 2022. Радиометр на частоте 2.3 ГГц с 7 по 27 апреля был временно демонтирован, а в начале мая из-за плохой погоды ряд наблюдений был исключен из обработки на обеих частотах. Наблюдения на центральной частоте 4.7 ГГц проводились на комплексе из четырех четырехканальных радиометров, параметры которых были приведены в Таблице 3 Главы 1.

Начало наблюдений блазара совпало с его яркой вспышкой с максимальной плотностью потока $S_{4.7} = 3$ Ян. На Рис. 4.5 приведена кривая блеска вспышки длительностью 4.5 года (01.04.2019), измеренной на Северном секторе РАТАН-600 (фиолетовым цветом, заимствовано из работы [172]) и на Западном секторе (синим цветом).

Данные обзора на Западном секторе на 4.7 ГГц в четырех каналах каждого радиометра были получены со средневзвешенным накоплением, а затем, после перевода кривых блеска в плотность потока, усреднены по четырем радиометрам. Это было сделано как для блазара, так и для калибровочного источника ЗС 138. Учитывая обнаруженную нестабильность излучения калибровочного источника ЗС 138 окончательная привязка была проведена между секторами по калибровочной кривой полученной при обработке калибровочных источников на Северном секторе РАТАН-600.

Общее число наблюдений составило 376 дней на 4.7 ГГц и 316 дней на 2.3 ГГц. Из-за относительно большего шума на 2.3 ГГц, чем на 4.7 ГГц (около двух раз) данные на 2.3 ГГц были усреднены за каждые три дня наблюдений.

На Рис. 4.6 представлены кривые блеска плотности потоков на 2.3 и 4.7 ГГц. Ошибки средних значений плотности потока 7% и 3% на 2.3 и 4.7 ГГц,

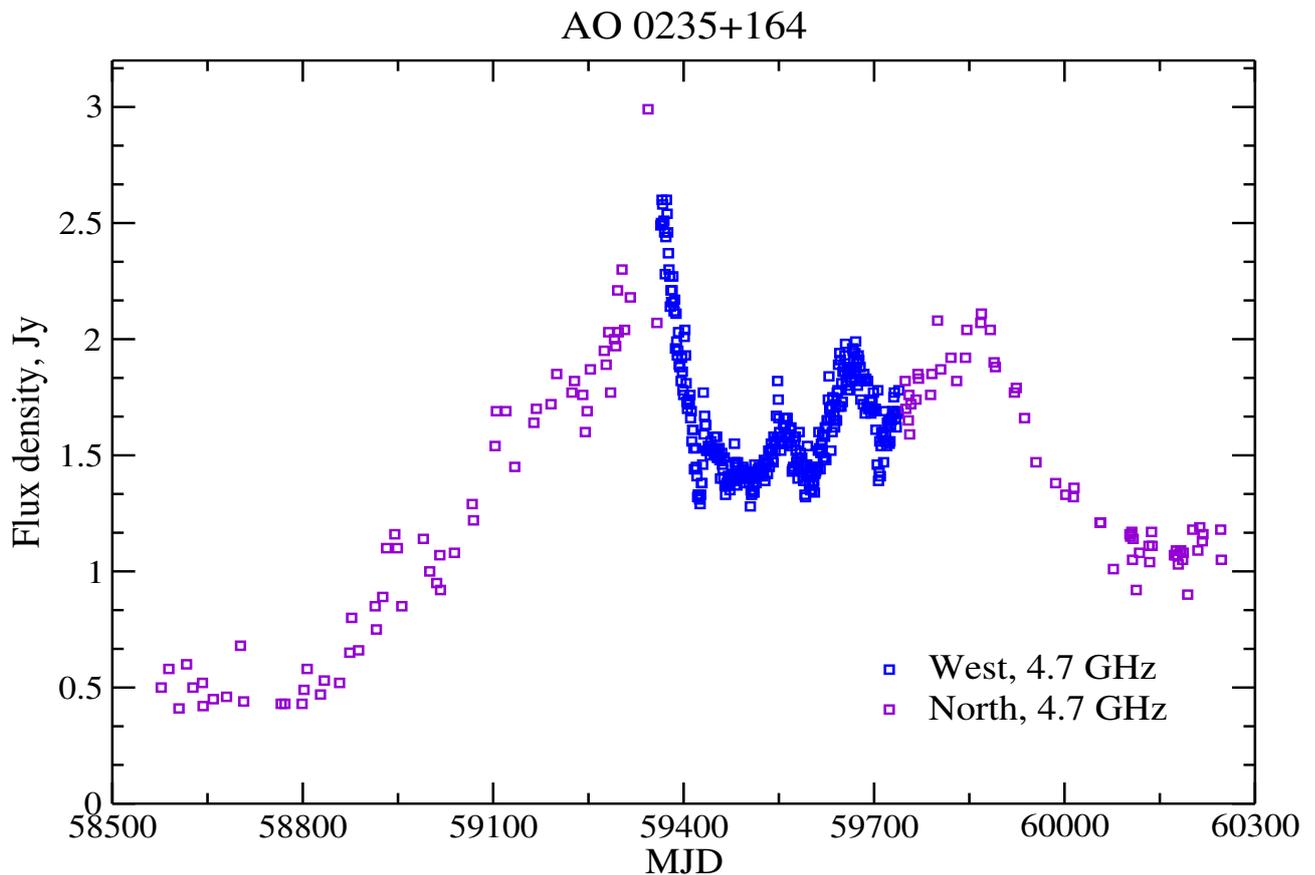


Рисунок 4.5 — Кривые блеска наблюдений источника АО 0235+164 (J023838+163658) на 4.7 ГГц во время обзора на Западном секторе (синие точки) на фоне наблюдений на Северном секторе РАТАН-600 (фиолетовый цвет), с 01.04.2019 по 01.11.2023 гг.

соответственно. В Приложении представлены полученные плотности потока на 4.7 и 2.3 ГГц.

На кривых блеска прослеживаются изменения плотности потока на частоте 4.7 и 2.3 ГГц. На частоте 4.7 ГГц выявлено три относительно небольшие повторные вспышки с плотностью потока в максимуме около MJD 59445, MJD 59559 и MJD 59662, как показано на Рис. 4.6. На этом же рисунке видно, что за пределами цикла началась следующая вспышка. Из работы [172] были использованы недостающие значения следующей вспышки на частоте 4.7 ГГц, полученные на Северном секторе РАТАН-600 и добавлены к кривым блеска обзора. На рисунке 4.7 приведена эта кривая блеска на частоте 4.7 ГГц, на котором розовым фиолетовым обозначены измерения на Северном секторе.

Кроме указанных повторных вспышек на этой кривой блеска просматриваются быстрые всплески в несколько дней неясной природы. Параметры вспышек приведены в таблице 11.

4.3 Анализ переменности кривых блеска АО 0235+164

С помощью полученных измерений спектральной плотности потока был рассчитаны двухчастотные спектральные индексы, которые представлены на Рис. 4.8.

Кривая изменения спектрального индекса коррелирует с плотностью потока на 2.3 и 4.7 ГГц (Рис. 4.6), изменяясь за время наблюдений от +0.20 до +0.75, что указывает на оптически толстую область излучения в течение всего

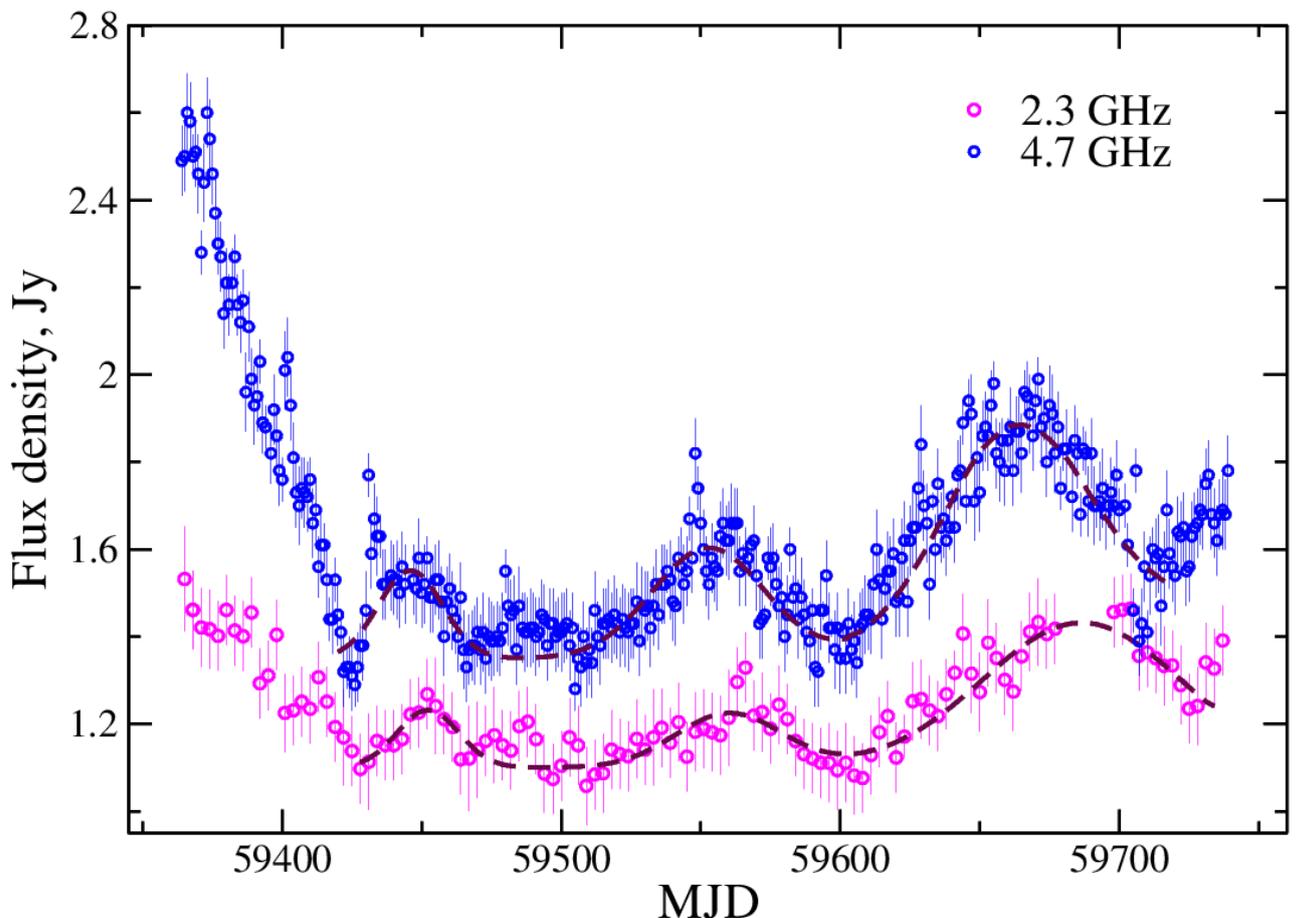


Рисунок 4.6 — Кривые блеска блазара АО 0235+164 на частоте 4.7 и 2.3 ГГц, полученные на Западном секторе РАТАН-600 с 28.05.2021 по 08.06.2022

AO 0235+164

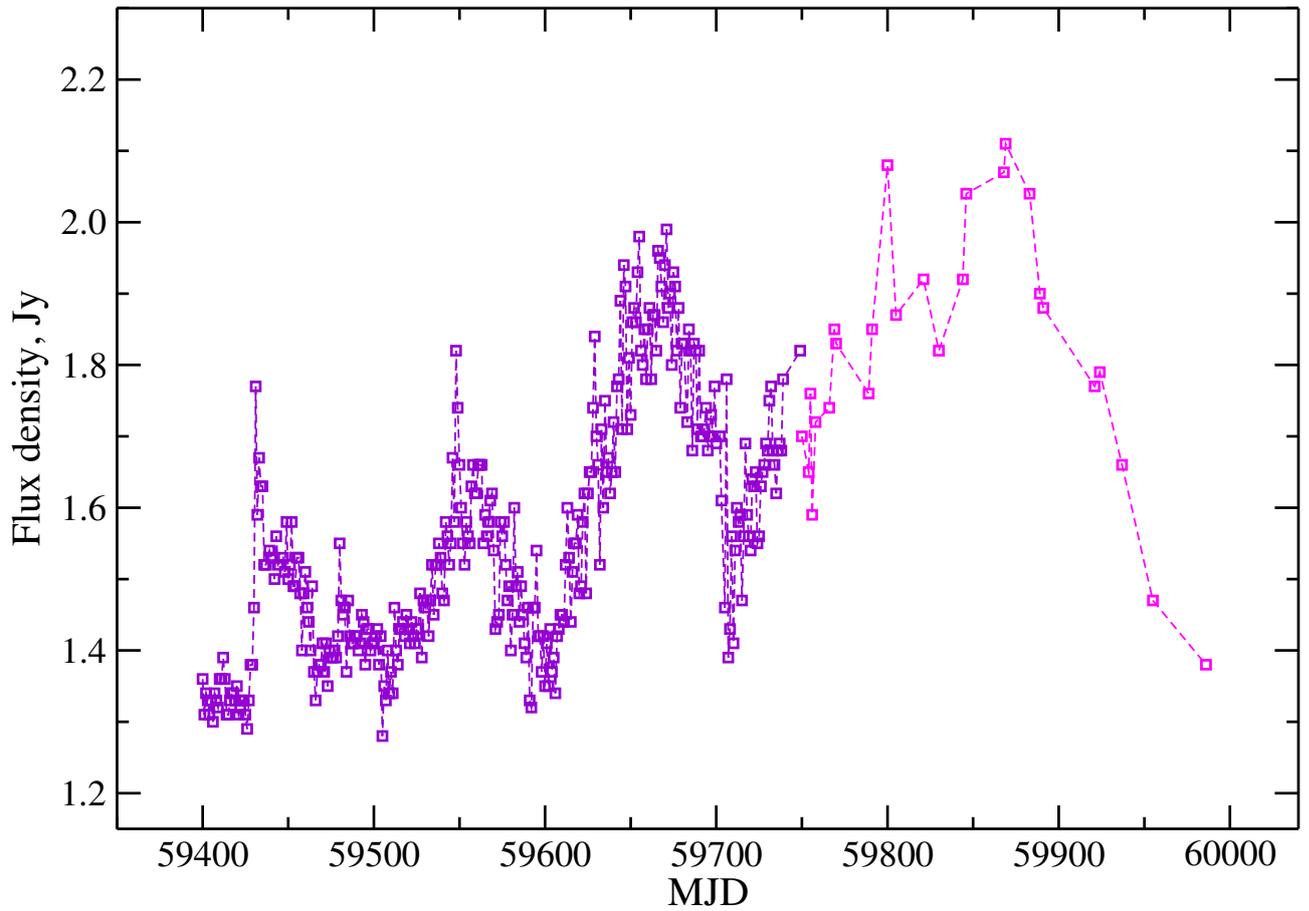


Рисунок 4.7 — Кривые блеска вспышек блазара AO 0235+164 на частоте 4.7 ГГц с добавлением данных с Северного сектора РАТАН-600 (обозначено розовым цветом)

периода наблюдений в 2021-2022 гг. и особенно во время увеличения плотности потоков с максимумов около MJD 59450, MJD 59550 и MJD 59660.

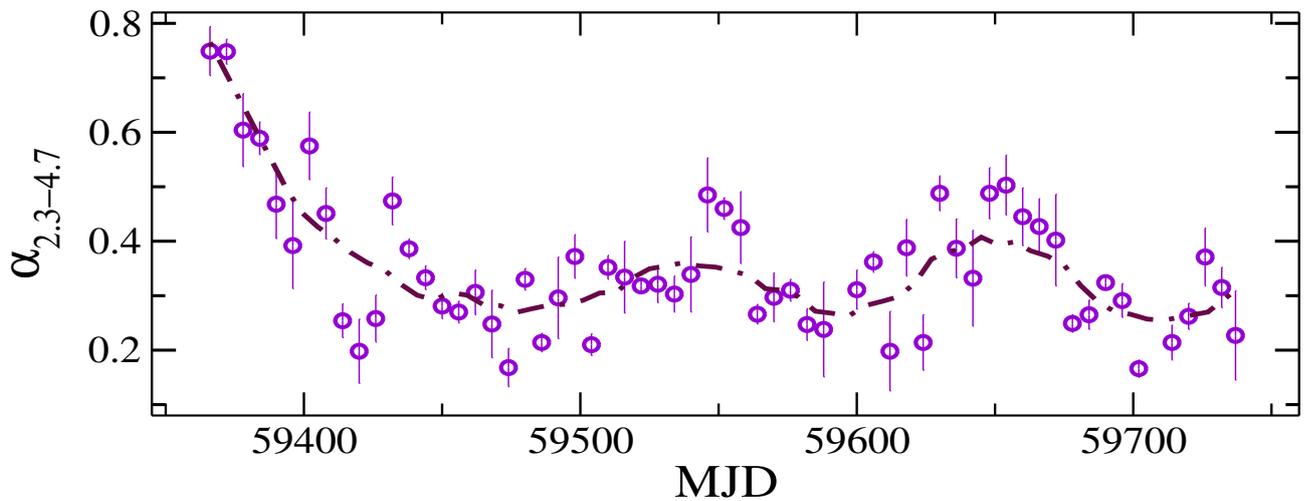


Рисунок 4.8 — Кривая спектральных индексов $\alpha_{2.3-4.7}$ между частотами 4.7 и 2.3 ГГц

С помощью полученных измерений спектральной плотности потока был проведён анализ кратковременной переменности (от дня ко дню) радиоизлучения на двух частотах и двухчастотного спектрального индекса. Кривые блеска на двух частотах

Медианное значение плотности потока на 4.7 ГГц равно 1.56 Ян, максимальное – 2.6 ± 0.06 , минимальное – 1.28 ± 0.004 . Индекс переменности $V_S = 0.32 \pm 0.07$, фракционная переменность $F_{\text{var}} = 0.16 \pm 0.0017$, модуляционный индекс $M = 0.03$.

Медианное значение плотности потока на 2.3 ГГц равно 1.23 Ян, максимальное – 1.77 ± 0.13 , минимальное – 0.98 ± 0.07 . Индекс переменности $V_S = 0.22 \pm 0.14$, фракционная переменность $F_{\text{var}} = 0.093 \pm 0.0046$, модуляционный индекс $M = 0.12$.

Структурная функция для кривой блеска на 4.7 ГГц представлена на рисунке 4.9. Расчёт проводился с начальным шагом в 1 день. Как было показано в первой главе, временной масштаб – максимальный масштаб коррелированного поведения сигнала. Величина наклона b характеризует природу переменного процесса. В случае единичной доминирующей вспышки $b > 1$ [72]. Структурная функция выходит на плато на масштабе переменности ~ 120 дней, что соответствует максимальной продолжительности вспышек. Наклон между двумя плато равен $b \sim 1.2$, что говорит о процессе переменности как о единичной доминирующей вспышке.

Периодограмма Ломба-Скаргла была применена с целью поиска периодических вариаций и показала пик с периодом 100 ± 10 дней, как показано на Рис. 4.11. Однако уровень значимости пиков, FAP (false alarm probability) > 1 %. При вычитании линейного тренда из кривых блеска периодограмма Ломба-Скаргла демонстрирует два пика с периодом 100 ± 10 дней и 165 ± 4 дня с

Таблица 11 — Параметры вспышек и всплесков блазара АО 0235+164 на частоте 4.7 ГГц, выявленных во время обзора

максимум вспышки, MJD	длительность, число дней	плотность потока, Ян	всплески, MJD	амплитуда всплеска, Ян	сектор обзора
59445	50	0.18	59433	0.27	запад
59559	80	0.22	59547	0.23	запад
59662	110	0.45	59630	0.22	запад
59880	225	0.48	59800	0.24	север

уровнем значимости, $FAP < 1 \%$. Такой же результат достигается, если включить в рассмотрение вспышку произошедшую сразу после проведения обзора на Западном секторе, но зафиксированную на Северном секторе РАТАН-600, как показано на Рис. 4.11 и приведено в Таблице 11.

Анализ методом дискретной корреляционной функции (DCF) демонстрирует сильную корреляцию между плотностью потока на 4.7 и 2.3 ГГц. Максимальное значение $DCF = 0.86 \pm 0.06$ (уровнем достоверности $> 3\sigma$) и с временной задержкой $\tau = 7 \pm 1$ дней (Рис. 4.10).

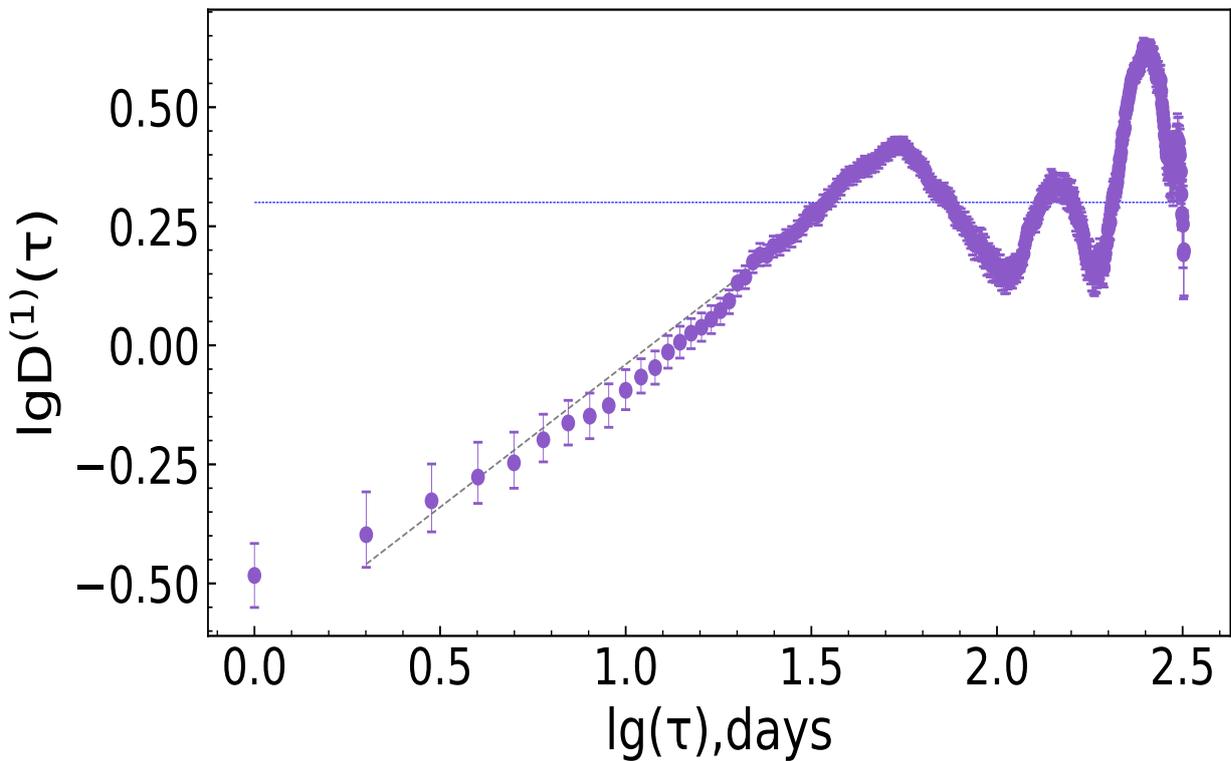


Рисунок 4.9 — Структурная функция блазара АО 0235+165 для кривой блеска на частоте 4.7 ГГц

4.4 Идентификация вторичных вспышек блазара АО 0235+164

На Рис. 4.2 представлены VLBA изображения АО 0235+164 на частоте 86 ГГц с деталями размером 3-5 парсек, полученные в период проведения обзора на РАТАН-600.

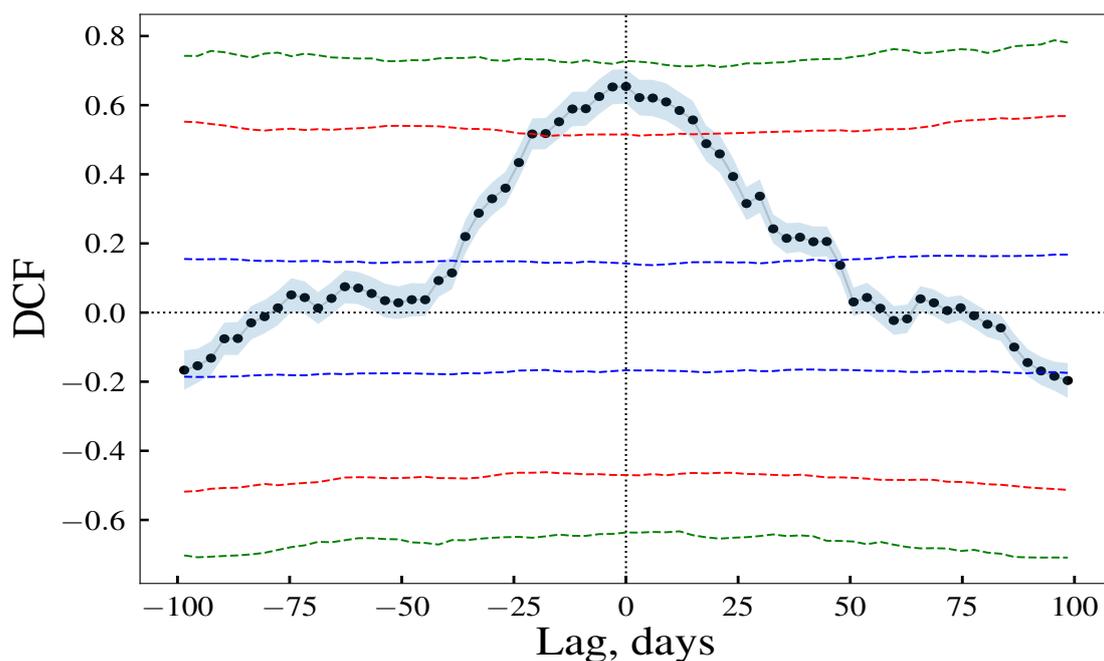


Рисунок 4.10 — Дискретная корреляционная функция для кривых блеска на частоте 4.7 и 2.3 ГГц. Горизонтальными линиями показаны уровни статистической значимости 1, 2 и 3 σ

Изображения были проанализированы на предмет связи со вспышками, полученными в настоящей работе. На Рис. 4.12 приведены кривые блеска на VLBA на частоте 43 ГГц и 4.7 ГГц полученные на РАТАН-600 за период времени с 2014 по 2023 годы. Задачей было кросс-корреляция между наблюдениями, чтобы определить возможную связь выбросов видимых на 86 ГГц со вспышками на 4.7 ГГц. Кросс-корреляция дает смещение 0-10 суток кривой блеска на 43 ГГц относительно 4.7 ГГц, что близко к третьему пику. Однако выборка данных в период проведения обзора на 4.7 ГГц не показывает на смещение (Рис. ??). Это указывает на то, что обнаруженные три небольших вспышки на кривой блеска скорее всего связаны с внутренними процессами в джете блазара, а не с внешней средой по пути излучения к наблюдателю.

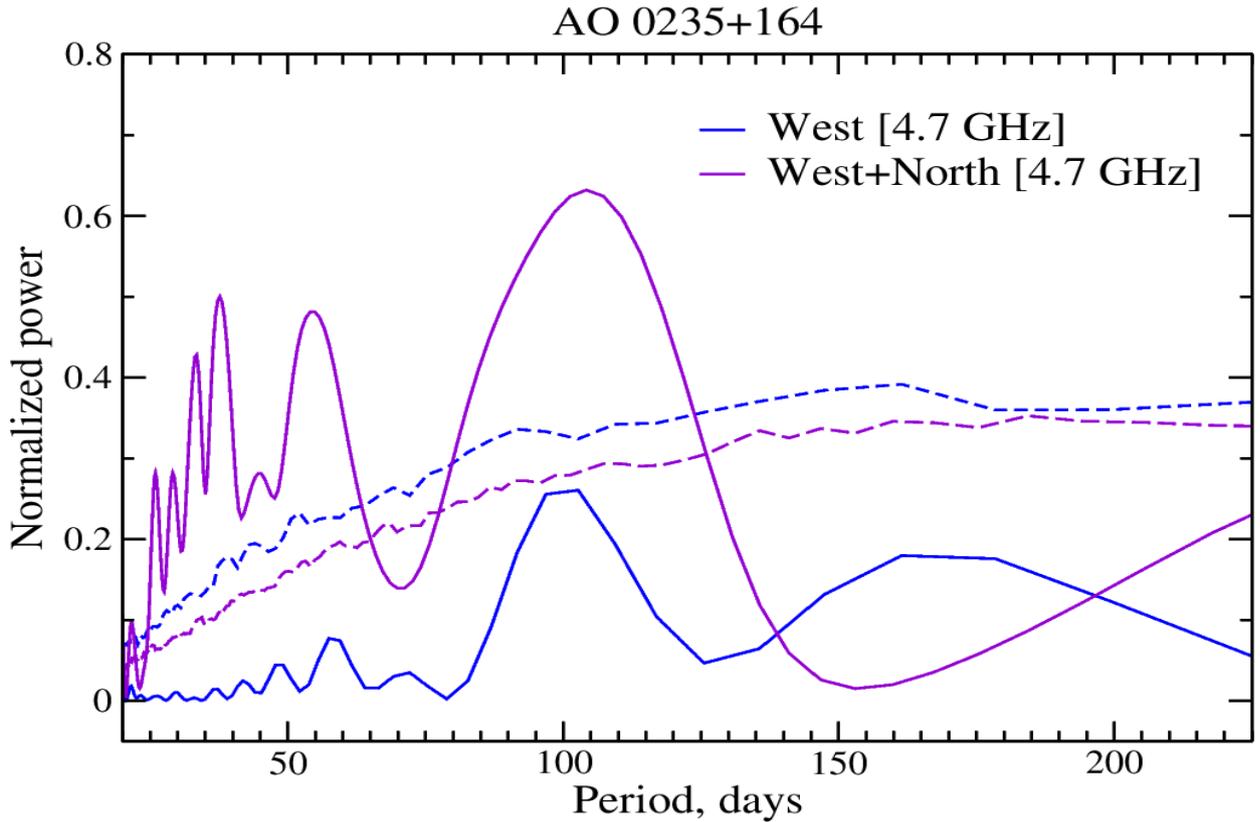


Рисунок 4.11 — Периодограмма Ломба-Скаргла для кривых блеска. Синяя штриховая линия - только по кривой блеска с Западного сектора на 4.7 ГГц, фиолетовая - для данных с Северного сектора; штриховыми линиями обозначен уровень значимости, $FAP = 1\%$

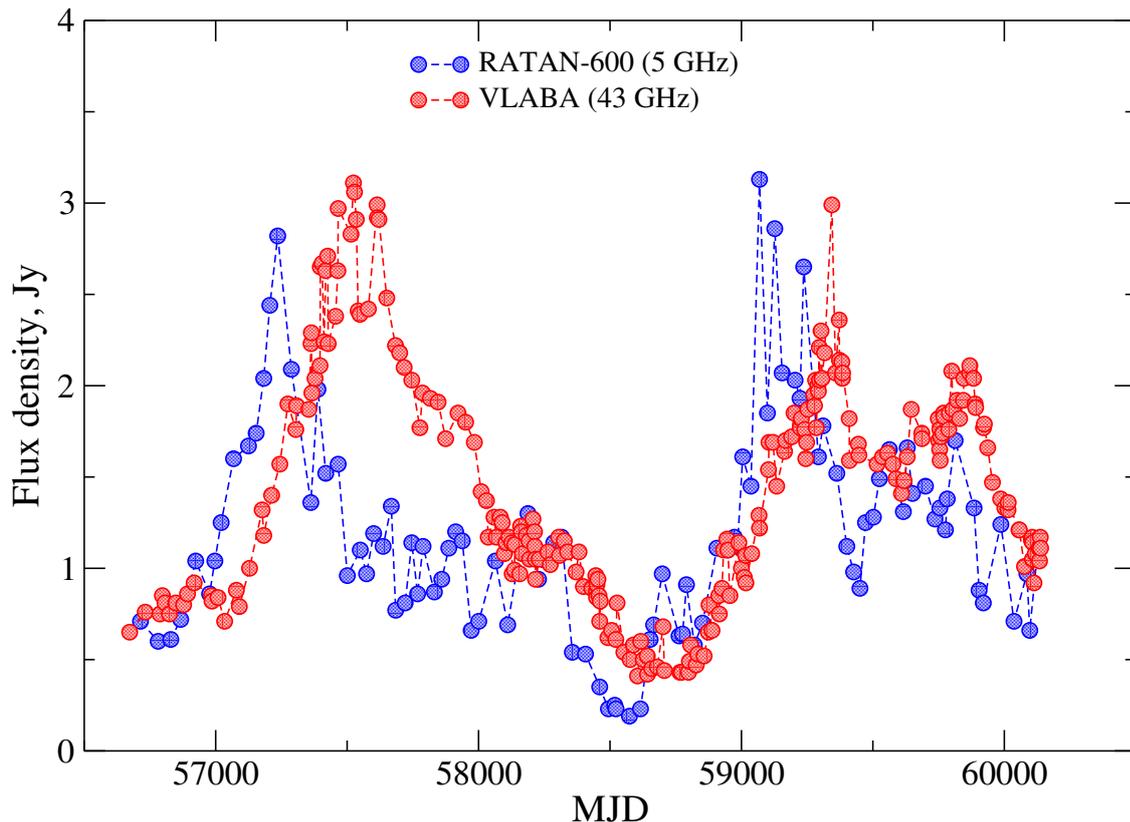


Рисунок 4.12 — Кривые блеска полученные на VLBA на частоте 43 и РАТАН-600 на 4.7 ГГц в период времени 2014-2023 гг.

Наиболее показательным является сравнение данных обзора на Западном секторе РАТАН-600 с длительными обзорами на радиотелескопе Грин Бэнк [28]. На рисунке 4.13 приведены данные этих обзоров за период более 13.5 лет на 2.3 и 8.3 ГГц в период с 1982.0 по 1994.5 гг.

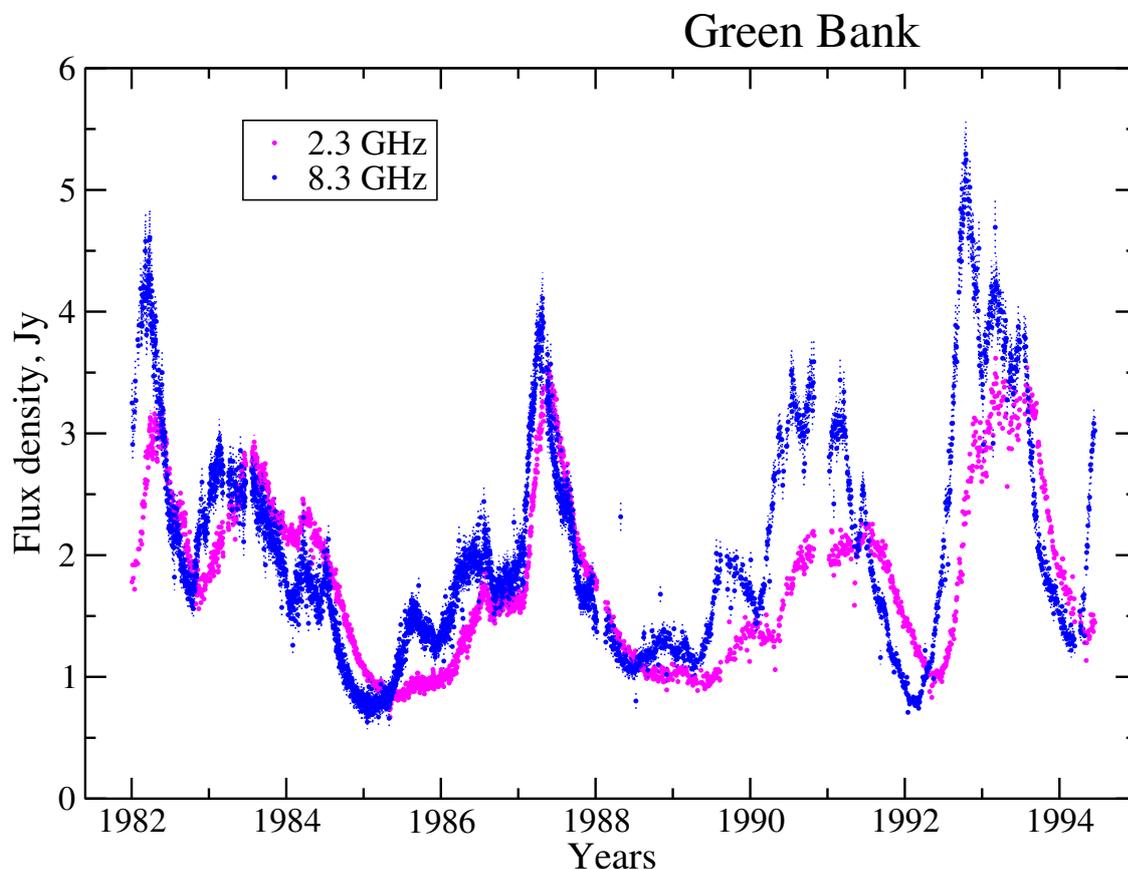


Рисунок 4.13 — Кривые блеска полученные в обзоре на интерферометре Грин Бэнк на частоте 2.3 и 8.3 ГГц в период времени 1982.0-1994.5 гг.

Кривые блеска были обработаны по той же схеме, что и данные обзора на Западном секторе. Целью обработки был поиск структур, обнаруженных в обзоре на Западном секторе на частотах 2.3 и 4.7 ГГц. На рисунке 4.14 приведены структурные функции рассчитанные на обеих частотах. Среднее запаздывание структур на кривых блеска составило порядка 10 дней на 2.3 ГГц относительно 8.3 ГГц, но в период проведения обзора на РАТАН-600 запаздывания не обнаружено. Это говорит о том, что области генерации излучения в этот период были близко расположены. В то же время на высокой частоте 8.3 ГГц во время некоторых основных вспышек прослеживаются структуры близкие к 100 дневным изменениям излучения. Это видно на структурной функции по кривой блеска на этой частоте, но ее уровень не дотягивает до значимого 0.3. Однако на 2.3 ГГц таких структур не обнаружено, тем более между основными вспышками.

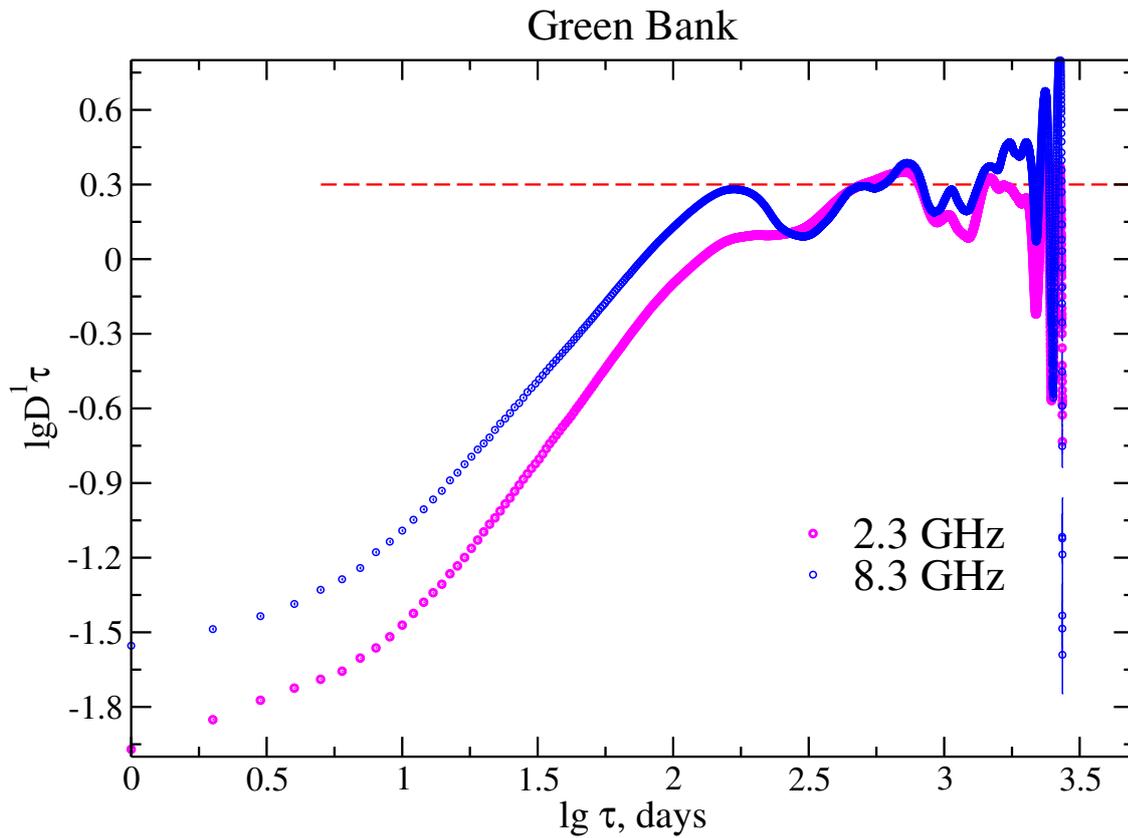


Рисунок 4.14 — Структурные функции по кривым блеска Грин Бэнка на частоте 2.3 и 8.3 ГГц в период 1983-1994 гг.

4.5 Влияние межзвёздных мерцаний на наблюдаемый уровень переменности спектральной плотности потока излучения

Для точечного источника отношение между частотой наблюдения и переходной частотой определяет уровень модуляции m спектральной плотности потока и её временной масштаб t в указанных двух режимах согласно формулам из [137]

Для координат исследуемого блазара R.A. = 02:38:38.9 Dec = 16:36:59 переходная частота $\nu_0 = 3.8$. Из этого следует, для 3.2 ГГц реализуется режим сильных рассеяний, а 4.7 ГГц реализуется режим слабых рассеяний. Размер первой зоны Френеля $\theta_F = 0.03$ mas.

Для медианной спектральной плотности потока на частоте 4.7 ГГц $\theta_{\min} = 0.15$ mas. Уровень модуляции плотности потока m примерно 4% для размера источника $\theta_s = 4 \times \theta_{\min} = 0.6$ mas. Временной масштаб RISS t по-

рядка полутора суток, что не может быть сглажено за время наблюдения на РАТАН-600.

Для медианной спектральной плотности потока на частоте 2.3 ГГц $\theta_{\min} = 0.26$ mas. Уровень модуляции плотности потока m примерно 1% для размера источника $\theta_s = 4 \times \theta_{\min} = 1.04$ mas. Временной масштаб RISS t больше восьми суток, что не может быть сглажено за время наблюдения на РАТАН-600.

что означает доминирующий вклад RISS, и около 2% для $\theta_s = 8 \times \theta_{\min} = 2.08$ mas в случае вклада RISS сравнимого со внутренней переменностью.

Размер источника $\theta_s = 0.5\text{--}1.0$ mas на 2 и 5 ГГц сопоставим с размерами PKS 1614+051 по данным РСДБ [140; 141].

Можно сделать вывод, что эффекты RISS могут быть существенными для ежедневных наблюдений PKS 1614+051 на 4.7 и 2.3 ГГц.

4.6 Выводы главы 3

1. Получены кривые блеска за каждый день на 2.3 и 4.7 ГГц блазара АО 0235+164 в период времени 2021-2022 гг. Всего получено 376 наблюдений на 4.7 ГГц и 316 наблюдений на 2.3 ГГц со средней ошибкой измерений 5 и 3 %, соответственно.
2. На основе полученных данных проведён анализ переменности блазара АО 0235+164. Индекс переменности $V_S = 0.32 \pm 0.07$, фракционная переменность $F_{\text{var}} = 0.16 \pm 0.0017$, модуляционный индекс $M = 0.03$.
3. Оценен вклад МЗС на наблюдаемый уровень переменности. На 4.7 ГГц вклад мерцаний на МЗС равен 4%, а на 2.3 ГГц 1%
4. Впервые обнаружены вспышки излучения на масштабах времени около 110 дней со средней периодичностью около 100 дней. Эволюция спектрального индекса $\alpha_{2.3-4.7}$ в течение года изменялась от +0.20 в относительно спокойном состоянии до +0.75 во время непродолжительных вспышек (~50-60 дней).
5. Обнаружена статистически значимая корреляция ($>3\sigma$) $>90\%$ между кривыми блеска на 2.3 и 4.7 ГГц с временной задержкой $\tau = 7 \pm 1$ дней.

Заключение

В рамках работы исследована переменность радиоизлучения АЯГ с помощью данных, полученных в обзорах неба на Западном секторе РАТАН-600. Исследованные АЯГ наблюдались в трёх обзорах с 2018 по 2022 год. Всего исследовано 207 объектов.

1. Создана методика обработки наблюдений источников в обзорах неба на Западном секторе РАТАН-600 при неподвижной антенне. С помощью методики в обзоре за 2018-2019 гг. на Западном секторе радиотелескопа РАТАН-600 на склонении пульсара в Крабовидной туманности ($\text{Dec} = 22^\circ$) на трехлучевом радиометрическом комплексе на частоте 4.7 ГГц обнаружено 205 ярких источников ($S/N > 50$, $S_\nu > 15$ мЯн). Для всех объектов получены средние за год спектральные плотности потока излучения и средние значения за каждый месяц наблюдений. Для 26 наиболее ярких источников были получены плотности потока излучения за каждые три дня. Обнаружено двукратное увеличение плотности потока излучения блазара В2 1324+224 на масштабе 1 года наблюдений ($V_S = 0.3$). Анализ кривых блеска показал, что индекс переменности радиоизлучения пяти квазаров $V_S \sim 0.2$, а у остальных источников $V_S \leq 0.15$.
2. Проведена кросс-идентификация с опубликованными радиокаталогами с помощью базы данных CATS и построены спектры 205 ярких радиоисточников, для 50 объектов данные получены впервые на частотах $\nu \geq 4.7$ ГГц. Из них 124 источника (61%) имеют степенной спектр ($-1.1 < \alpha < -0.5$, $S_\nu \sim \nu^\alpha$), 22 источника с пиковым распределением в радиоспектре — источники типа CSS - GPS с максимумом излучения 0.1-5 ГГц и, как предполагается, относятся к молодым компактным объектам; 25 источников являются источниками с USS ($\alpha < -1.1$) и, вероятно, относящихся к далеким радиогалактикам в скоплениях с активным звездообразованием, HzRGs, либо к компактным объектам типа CSS; 26 источников имеют плоский спектр ($-0.5 < \alpha < 0.3$) - квазары и блазары; три источника имеют инвертированный спектр ($\alpha > 0.3$), возможно тепловой. имеют подъем в спектре на низких частотах. В зависимости

- «плотность потока – спектральный индекс» прослеживается укрупнение спектральных индексов с уменьшением плотности потока источников, а в зависимости «красное смещение - спектральный индекс» - уплощение спектральных индексов с увеличением z , что не согласуется с такими распределениями на низких частотах. Мы полагаем, что это связано со значительным вкладом далеких квазаров с мощным радиоизлучением.
3. Кросс идентификация с оптическими данными проведена с использованием каталогов SDSS (DR16), Gaia (DR3) Extragalactic, PanSTARRS, инфракрасного каталога 2MASS и баз данных SIMBAD, NED, RomaBZCAT. Всего отождествлено 86% источников выборки. Протяженными являются 44% процента источников, точечными – 42%. Остальные не отождествлены. Лишь 30% источников имеют определенный физический тип. Во всей выборке: квазаров – 18%, блазаров – 6%, галактик – около 6%. Протяженные объекты, вероятно, связаны с более слабыми или далекими галактиками. Отождествлены только с инфракрасными данными 35 объектов.
 4. Получены кривые блеска на 2.3 и 4.7 ГГц и исследовано излучение от блазара АО 0235+164 в период времени 2021-2022гг со средней ошибкой измерений 5 и 3%, соответственно. Обнаружены вспышки на масштабах времени около 110 дней со средней периодичностью около 100 дней. Эволюция спектрального индекса $\alpha_{2.3-4.7}$ в течение года изменялась от +0.20 в относительно спокойном состоянии до +0.75 во время непродолжительных вспышек (~50-60 дней).

Список литературы

1. A Survey of radio sources at frequency 159 Mc/s. / D. O. a. J. R. Edge [и др.] // *Memoirs of the Royal Astronomical Society*. — 1959. — т. 68. — с. 37—60.
2. *Pilkington J. D. H., Scott J. F.* A survey of radio sources between declinations 20° and 40° // *Memoirs of the Royal Astronomical Society*. — 1965. — т. 69. — с. 183.
3. *Gower J. F. R., Scott P. F., Wills D.* A survey of radio sources in the declination ranges -07° to 20° and 40° to 80° . // *Memoirs of the Royal Astronomical Society*. — 1967. — т. 71. — с. 49.
4. *Wright A., Otrupcek R.* PKSCAT90: The southern radio source database // *Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires*. — 1992. — июль. — т. 41. — с. 47.
5. The GB6 Catalog of Radio Sources / P. C. Gregory [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1996. — апр. — т. 103. — с. 427. — DOI: 10.1086/192282.
6. The NRAO VLA Sky Survey / J. J. Condon [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 1998. — май. — т. 115, № 5. — с. 1693—1716. — DOI: 10.1086/300337.
7. *Becker R. H., White R. L., Helfand D. J.* The VLA's FIRST Survey // *Astronomical Data Analysis Software and Systems III*. т. 61 / под ред. D. R. Crabtree, R. J. Hanisch, J. Barnes. — 01.1994. — с. 165. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
8. The GMRT 150 MHz all-sky radio survey. First alternative data release TGSS ADR1 / H. T. Intema [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — февр. — т. 598. — A78. — DOI: 10.1051/0004-6361/201628536. — arXiv: 1603.04368 [astro-ph.CO].
9. GaLactic and Extragalactic All-sky Murchison Widefield Array (GLEAM) survey - I. A low-frequency extragalactic catalogue / N. Hurley-Walker [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — янв. —

- т. 464, № 1. — с. 1146—1167. — DOI: 10.1093/mnras/stw2337. — arXiv: 1610.08318 [astro-ph.GA].
10. The Karl G. Jansky Very Large Array Sky Survey (VLASS). Science Case and Survey Design / M. Lacy [и др.] // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2020. — март. — т. 132, № 1009. — с. 035001. — DOI: 10.1088/1538-3873/ab63eb. — arXiv: 1907.01981 [astro-ph.IM].
 11. *Vol'vach A. E., Larionov M. G.* RT-22 KrAO: from the Simeiz sky survey to the selection of sources for the RadioAstron flight program // Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ. — 2008. — нояб. — т. 104, № 5. — с. 78—84. — URL: <https://jncrao.ru/index.php/izvcrao/article/view/822>.
 12. *Parijskij Y. N.* RATAN-600 - The world's biggest reflector at the "cross roads" // IEEE Antennas and Propagation Magazine. — 1993. — авг. — т. 35. — с. 7—12. — DOI: 10.1109/74.229840.
 13. *Parijskij YU. N. and Korol'kov D. V.* Experiment COLD: the first deep sky survey with the RATAN-600 radio telescope. // Sov. Sci. Rev. E Astrophys. Space Phys. — 1986. — т. 5. — с. 39—179.
 14. The RATAN-600 7.6 cm catalog of radio sources from Experiment Cold-80 / I. N. Parijskij [и др.] // Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser. — 1991. — янв. — т. 87. — с. 1—32.
 15. The RATAN-600 7.6 cm catalog of radio sources from "Experiment Cold-80". / I. N. Parijskij [и др.] // Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser. — 1991. — янв. — т. 87. — с. 1—32.
 16. The update catalog of RC sources (RATAN-600). / N. N. Bursov [и др.] // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 1996. — янв. — т. 42. — с. 5—207.
 17. RATAN-600 7.6-cm deep sky strip surveys at the declination of the SS433 source during the 1980-1999 period. Data reduction and the catalog of radio sources in the right-ascension interval $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$ / N. S. Soboleva [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2010. — янв. — т. 65, № 1. — с. 42—59. — DOI: 10.1134/S1990341310010050. — arXiv: 1003.0829 [astro-ph.CO].

18. *Amirkhanyan V. R., Gorshkov A. G., Konnikova V. K.* Complete sample of radio sources at 3.9, 4.8, 7.5, and 11.2 GHz from the Zelenchuk survey // *Astronomicheskii Zhurnal*. — 1992. — апр. — т. 69. — с. 225.
19. RATAN-600 new zenith field survey and CMB problems / Y. Parijskij [и др.] // *Gravitation and Cosmology*. — 2005. — т. 10. — с. 1–10.
20. Multi-frequency survey of background radiations of the Universe. The “Cosmological Gene project”. First results / Y. N. Parijskij [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2011. — окт. — т. 66, № 4. — с. 424–435. — DOI: 10.1134/S1990341311040043.
21. *Semenova T. A., Bursov N. N., Pariiskii Y. N.* Radio spectra of objects in the RATAN-600 RZF catalog and a population analysis of faint radio sources // *Astronomy Reports*. — 2007. — апр. — т. 51, № 4. — с. 257–263. — DOI: 10.1134/S1063772907040014.
22. Small-scale galactic emission fluctuation observations with RATAN-600 radio telescope / V. A. Stolyarov [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — янв. — т. 67, № 1. — с. 29–43. — DOI: 10.1134/S1990341312010038.
23. Spectroscopy of “Big Trio” objects using the “Scorpio” spectrograph of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory / Y. N. Parijskij [и др.] // *Astronomy Reports*. — 2010. — авг. — т. 54, № 8. — с. 675–695. — DOI: 10.1134/S1063772910080019. — arXiv: 1011.1649 [astro-ph.CO].
24. Five years monitoring of extragalactic radio sources. I. Observations at 12,22 and 37 GHz. / E. Salonen [и др.] // *Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser.* — 1987. — сент. — т. 70. — с. 409–435.
25. Long-Term Variability of Radio-Bright BL Lacertae Objects / E. Nieppola [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 2009. — июнь. — т. 137, № 6. — с. 5022–5036. — DOI: 10.1088/0004-6256/137/6/5022. — arXiv: 0910.2607 [astro-ph.CO].
26. Blazars in the Fermi Era: The OVRO 40 m Telescope Monitoring Program / J. L. Richards [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 2011. — июнь. — т. 194, № 2. — с. 29. — DOI: 10.1088/0067-0049/194/2/29. — arXiv: 1011.3111 [astro-ph.CO].

27. Spectra and linear polarizations of extragalactic variable sources at centimeter wavelengths. / H. D. Aller [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1985. — дек. — т. 59. — с. 513—768. — DOI: 10.1086/191083.
28. A Dual-Frequency, Multiyear Monitoring Program of Compact Radio Sources / T. J. W. Lazio [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2001. — окт. — т. 136, № 2. — с. 265—392. — DOI: 10.1086/322531. — arXiv: astro-ph/0105433 [astro-ph].
29. Investigating the multiwavelength behaviour of the flat spectrum radio quasar CTA 102 during 2013-2017 / F. D’Ammando [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — дек. — т. 490, № 4. — с. 5300—5316. — DOI: 10.1093/mnras/stz2792. — arXiv: 1910.03609 [astro-ph.HE].
30. Multiwavelength behaviour of the blazar 3C 279: decade-long study from gamma-ray to radio / V. M. Larionov [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — март. — т. 492, № 3. — с. 3829—3848. — DOI: 10.1093/mnras/staa082. — arXiv: 2001.06512 [astro-ph.HE].
31. Multimessenger Characterization of Markarian 501 during Historically Low X-Ray and γ -Ray Activity / H. Abe [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2023. — июнь. — т. 266, № 2. — с. 37. — DOI: 10.3847/1538-4365/acc181. — arXiv: 2210.02547 [astro-ph.HE].
32. Multiband cross-correlated radio variability of the blazar 3C 279 / A. Krishna Mohana [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2024. — янв. — т. 527, № 3. — с. 6970—6980. — DOI: 10.1093/mnras/stad3583. — arXiv: 2311.02395 [astro-ph.HE].
33. *Sholomitskii G. B.* Fluctuations in the 32.5-cm Flux of CTA 102 // *Astronomicheskii Zhurnal*. — 1965. — янв. — т. 42. — с. 673.
34. *Dent W. A.* Variation in the Radio Emission of 3C273 and Other Quasi-Stellar Sources. // *Astronomical Journal*. — 1965. — нояб. — т. 70. — с. 672. — DOI: 10.1086/109792.
35. *Maltby P., Moffet A. T.* Time Dependence of the Radio Emission from CTA 21 and CTA 102. // *Astrophysical Journal*. — 1965. — июль. — т. 142. — с. 409. — DOI: 10.1086/148304.

36. *van der Laan H.* A Model for Variable Extragalactic Radio Sources // Nature. — 1966. — сент. — т. 211, № 5054. — с. 1131—1133. — DOI: 10.1038/2111131a0.
37. *Rees M. J.* Studies in radio source structure-I. A relativistically expanding model for variable quasi-stellar radio sources // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1967. — янв. — т. 135. — с. 345. — DOI: 10.1093/mnras/135.4.345.
38. *Villata M., Raiteri C. M.* Helical jets in blazars. I. The case of MKN 501 // Astronomy and Astrophysics. — 1999. — июль. — т. 347. — с. 30—36.
39. The complex variability of blazars: time-scales and periodicity analysis in S4 0954+65 / C. M. Raiteri [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — июль. — т. 504, № 4. — с. 5629—5646. — DOI: 10.1093/mnras/stab1268. — arXiv: 2104.15005 [astro-ph.HE].
40. OJ287: deciphering the ‘Rosetta stone of blazars’ / S. Britzen [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — авг. — т. 478, № 3. — с. 3199—3219. — DOI: 10.1093/mnras/sty1026.
41. Precession-induced Variability in AGN Jets and OJ 287 / S. Britzen [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2023. — июль. — т. 951, № 2. — с. 106. — DOI: 10.3847/1538-4357/acbbbc. — arXiv: 2307.05838 [astro-ph.HE].
42. *Korolkov D. V., Pariiskii I. N.* The Soviet RATAN-600 radio telescope // Sky and Telescope. — 1979. — апр. — т. 57. — с. 324—329.
43. *Gorshkov A. G., Konnikova V. K., Mingaliev M. G.* Long-term variability of a complete sample of flat-spectrum radio sources at declinations of 4° – 6° (B1950) // Astronomy Reports. — 2008. — апр. — т. 52, № 4. — с. 278—298. — DOI: 10.1134/S1063772908040033.
44. Survey of instantaneous 1-22 GHz spectra of 550 compact extragalactic objects with declinations from -30^{deg} to $+43^{\text{deg}}$ / Y. Y. Kovalev [и др.] // Astronomy & Astrophysics Supplement. — 1999. — нояб. — т. 139. — с. 545—554. — DOI: 10.1051/aas:1999406. — arXiv: astro-ph/0408264 [astro-ph].

45. *Gorshkov A. G., Konnikova V. K.* Variability at Frequencies 3.9 and 7.5 GHz: Radio Sources from the Zelenchukskii Survey with Fluxes $> 200\text{mJy}$ // *Astronomicheskii Zhurnal*. — 1995. — т. 72. — с. 291—302.
46. Observations of the bright radio sources in the North Celestial Pole region at the RATAN-600 radio telescope / M. G. Mingaliev [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2001. — апр. — т. 370. — с. 78—86. — DOI: 10.1051/0004-6361:20010215. — arXiv: astro-ph/0102275 [astro-ph].
47. RATAN-600 multi-frequency data for the BL Lacertae objects / M. G. Mingaliev [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — дек. — т. 572. — A59. — DOI: 10.1051/0004-6361/201424437. — arXiv: 1410.2835 [astro-ph.GA].
48. The RATAN-600 Multi-Frequency Catalogue of Blazars:BLcat / Y. V. Sotnikova [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2022. — дек. — т. 77, № 4. — с. 361—371. — DOI: 10.1134/S1990341322040149. — arXiv: 2211.11279 [astro-ph.HE].
49. Roma-BZCAT: a multifrequency catalogue of blazars / E. Massaro [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2009. — февр. — т. 495, № 2. — с. 691—696. — DOI: 10.1051/0004-6361:200810161. — arXiv: 0810.2206 [astro-ph].
50. The 5th edition of the Roma-BZCAT. A short presentation / E. Massaro [и др.] // *Astrophysics and Space Science*. — 2015. — май. — т. 357, № 1. — с. 75. — DOI: 10.1007/s10509-015-2254-2. — arXiv: 1502.07755 [astro-ph.HE].
51. Future Fast Radio Bursts (FRB) search with the RATAN-600 radio telescope at 4.7 GHz / S. A. Trushkin [и др.] // *SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy*. — 01.2018. — с. 211—216. — DOI: 10.26119/SAO.2020.1.52361.
52. *Spinrad H., Smith H. E.* AO 0235+164 a red BL Lacertae object. // *Astrophysical Journal*. — 1975. — окт. — т. 201. — с. 275—276. — DOI: 10.1086/153883.
53. Photometric and spectroscopic observations of the BL Lac object A 0235+164. / G. H. Rieke [и др.] // *Nature*. — 1976. — апр. — т. 260. — с. 754—758. — DOI: 10.1038/260754a0.

54. The First Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope / A. A. Abdo [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2010. — май. — т. 715, № 1. — с. 429—457. — DOI: 10.1088/0004-637X/715/1/429. — arXiv: 1002.0150 [astro-ph.HE].
55. The Nature of the BL Lacertae Object AO 0235+164 / R. D. Cohen [и др.] // Astrophysical Journal. — 1987. — июль. — т. 318. — с. 577. — DOI: 10.1086/165393.
56. An atlas of QSO spectra. / B. J. Wilkes [и др.] // Astronomical Society of Australia, Proceedings. — 1983. — янв. — т. 5, № 1. — с. 2—83. — DOI: 10.1017/S1323358000021664.
57. *Majorova E. K., Bursov N. N., Trushkin S. A.* RATAN-600 Beam Pattern and Drift Scans of Radio Sources in the Radio Telescope Operation Mode with the West Sector // Astrophysical Bulletin. — 2023. — сент. — т. 78, № 3. — с. 429—442. — DOI: 10.1134/S1990341323700141.
58. *Korzhavin A. N.* VPA (variable profile antenna) patterns for real modes. // Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii. — 1977. — янв. — т. 9. — с. 71—88.
59. *Tsybulev P. G.* New-generation data acquisition and control system for continuum radio-astronomic observations with RATAN-600 radio telescope: Development, observations, and measurements // Astrophysical Bulletin. — 2011. — янв. — т. 66, № 1. — с. 109—122. — DOI: 10.1134/S199034131101010X.
60. C-Band Radiometer for Continuum Observations at RATAN-600 Radio Telescope / P. G. Tsybulev [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2018. — окт. — т. 73, № 4. — с. 494—500. — DOI: 10.1134/S1990341318040132.
61. GLESP package for full sky CMB maps data analysis and its realization in the FADPS data processing system. / O. V. Verkhodanov [и др.] // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 2005. — май. — т. 58. — с. 40—50.
62. *Bursov N. N.* Deep sky surveys at RATAN-600 : PhD thesis / Bursov N. N. — Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, 2003.

63. *Kudryashova A. A., Bursov N. N., Trushkin S. A.* Radio Sources of the Survey on the Declination of the Pulsar in the Crab Nebula ($\text{Dec} = +22^\circ$) // *Astrophysical Bulletin*. — 2024. — март. — т. 79, № 1. — с. 36—59. — DOI: 10.1134/S1990341324700263.
64. *Hodges J. L., Lehmann E. L.* Estimates of Location Based on Rank Tests // *The Annals of Mathematical Statistics*. — 1963. — т. 34, № 2. — с. 598—611. — URL: <http://www.jstor.org/stable/2238406> (дата обр. 21.04.2025).
65. *Verkhodanov O. V., Trushkin S. A., Chernenkov V. N.* Cats : a Database System of Astrophysical Catalogs // *Baltic Astronomy*. — 1997. — март. — т. 6. — с. 275—278.
66. Development of ephemeris support in observations of distant radio sources and solar system objects at RATAN-600 radio telescope / A. N. Korzhavin [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — апр. — т. 67, № 2. — с. 225—229. — DOI: 10.1134/S1990341312020095.
67. *Aller M. F., Aller H. D., Hughes P. A.* Pearson-Readhead Survey Sources: Properties of the Centimeter-Wavelength Flux and Polarization of a Complete Radio Sample // *Astrophysical Journal*. — 1992. — нояб. — т. 399. — с. 16. — DOI: 10.1086/171898.
68. On characterizing the variability properties of X-ray light curves from active galaxies / S. Vaughan [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2003. — нояб. — т. 345, № 4. — с. 1271—1284. — DOI: 10.1046/j.1365-2966.2003.07042.x. — arXiv: astro-ph/0307420 [astro-ph].
69. Intraday variability in compact extragalactic radio sources. II. Observations with the Effelsberg 100 m radio telescope / A. Kraus [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — апр. — т. 401. — с. 161—172. — DOI: 10.1051/0004-6361:20030118.
70. Modeling the Time Variability of SDSS Stripe 82 Quasars as a Damped Random Walk / C. L. MacLeod [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — окт. — т. 721, № 2. — с. 1014—1033. — DOI: 10.1088/0004-637X/721/2/1014. — arXiv: 1004.0276 [astro-ph.CO].

71. *Simonetti J. H., Cordes J. M., Heeschen D. S.* Flicker of extragalactic radio sources at two frequencies. // *Astrophysical Journal*. — 1985. — сент. — т. 296. — с. 46—59. — DOI: 10.1086/163418.
72. *Hufnagel B. R., Bregman J. N.* Optical and Radio Variability in Blazars // *Astrophysical Journal*. — 1992. — февр. — т. 386. — с. 473. — DOI: 10.1086/171033.
73. Study of the variability and components of the pulsar B0823+26 at a frequency of 111 MHz / М. О. Тороров [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — янв. — т. 527, № 1. — с. 1594—1600. — DOI: 10.1093/mnras/stad3349. — arXiv: 2311.05376 [astro-ph.HE].
74. *Hughes P. A., Aller H. D., Aller M. F.* The University of Michigan Radio Astronomy Data Base. I. Structure Function Analysis and the Relation between BL Lacertae Objects and Quasi-stellar Objects // *Astrophysical Journal*. — 1992. — сент. — т. 396. — с. 469. — DOI: 10.1086/171734.
75. *Kolmogorov A. N.* Dissipation of Energy in Locally Isotropic Turbulence // *Akademiia Nauk SSSR Doklady*. — 1941. — апр. — т. 32. — с. 16.
76. *Kolmogorov A.* The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds' Numbers // *Akademiia Nauk SSSR Doklady*. — 1941. — янв. — т. 30. — с. 301—305.
77. *Rickett B. J., Coles W. A., Bourgois G.* Slow scintillation in the interstellar medium. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1984. — май. — т. 134. — с. 390—395.
78. *Emmanoulopoulos D., McHardy I. M., Uttley P.* On the use of structure functions to study blazar variability: caveats and problems // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — май. — т. 404, № 2. — с. 931—946. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16328.x. — arXiv: 1001.2045 [astro-ph.CO].
79. *Scargle J. D.* Studies in Astronomical Time Series Analysis. V. Bayesian Blocks, a New Method to Analyze Structure in Photon Counting Data // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — сент. — т. 504, № 1. — с. 405—418. — DOI: 10.1086/306064. — arXiv: astro-ph/9711233 [astro-ph].

80. *Lomb N. R.* Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data // *Astrophysics and Space Science*. — 1976. — февр. — т. 39, № 2. — с. 447—462. — DOI: 10.1007/BF00648343.
81. Determination of time-varying periodicities in unequally spaced time series of OH* temperatures using a moving Lomb-Scargle periodogram and a fast calculation of the false alarm probabilities / C. Kalicinsky [и др.] // *Atmospheric Measurement Techniques*. — 2020. — февр. — т. 13, № 2. — с. 467—477. — DOI: 10.5194/amt-13-467-2020.
82. Extragalactic Peaked-spectrum Radio Sources at Low Frequencies / J. R. Callingham [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2017. — февр. — т. 836, № 2. — с. 174. — DOI: 10.3847/1538-4357/836/2/174. — arXiv: 1701.02771 [astro-ph.GA].
83. *O’Dea C. P.* The Compact Steep-Spectrum and Gigahertz Peaked-Spectrum Radio Sources // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1998. — май. — т. 110, № 747. — с. 493—532. — DOI: 10.1086/316162.
84. *O’Dea C. P., Baum S. A., Stanghellini C.* What Are the Gigahertz Peaked-Spectrum Radio Sources? // *Astrophysical Journal*. — 1991. — окт. — т. 380. — с. 66. — DOI: 10.1086/170562.
85. High Frequency Peakers: Young radio sources or flaring blazars? / S. Tinti [и др.] // *AstronomyandAstrophysics*. — 2005. — март. — т. 432, № 1. — с. 31—43. — DOI: 10.1051/0004-6361:20041620. — arXiv: astro-ph/0410663 [astro-ph].
86. A survey of low-luminosity compact sources and its implication for the evolution of radio-loud active galactic nuclei - I. Radio data / M. Kunert-Bajraszewska [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — нояб. — т. 408, № 4. — с. 2261—2278. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.17271.x. — arXiv: 1009.5235 [astro-ph.CO].
87. A search for clusters at high redshift. II. A proto cluster around a radio galaxy at $z=2.16$ / L. Pentericci [и др.] // *AstronomyandAstrophysics*. — 2000. — сент. — т. 361. — с. L25—L28. — DOI: 10.48550/arXiv.astro-ph/0008143. — arXiv: astro-ph/0008143 [astro-ph].

88. High frequency peakers. I. The bright sample / D. Dallacasa [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2000. — нояб. — т. 363. — с. 887—900. — DOI: 10.48550/arXiv.astro-ph/0012428. — arXiv: astro-ph/0012428 [astro-ph].
89. Basic principles of a flexible astronomical data processing system in UNIX environment. / O. V. Verkhodanov [и др.] // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*. — 1993. — янв. — т. 36. — с. 132—137.
90. On the redshift cut-off for steep-spectrum radio sources / M. J. Jarvis [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2001. — нояб. — т. 327, № 3. — с. 907—917. — DOI: 10.1046/j.1365-8711.2001.04778.x. — arXiv: astro-ph/0106473 [astro-ph].
91. A search for distant radio galaxies from SUMSS and NVSS - II. Optical spectroscopy^{1*} / C. De Breuck [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — февр. — т. 366, № 1. — с. 58—72. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.09799.x. — arXiv: astro-ph/0511169 [astro-ph].
92. A search for distant radio galaxies from SUMSS and NVSS - III. Radio spectral energy distributions and the z - α correlation / I. J. Klammer [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — сент. — т. 371, № 2. — с. 852—866. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.10714.x. — arXiv: astro-ph/0606469 [astro-ph].
93. A new search for distant radio galaxies in the Southern hemisphere - II. 2.2μ imaging* / J. J. Bryant [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — апр. — т. 394, № 4. — с. 2197—2222. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.14500.x. — arXiv: 0902.0643 [astro-ph.CO].
94. *Gopal-Krishna, Steppe H.* Spectral index - Flux density relation for extragalactic radio sources found in metre-wavelength surveys. // *Astronomy and Astrophysics*. — 1982. — сент. — т. 113. — с. 150—154.
95. Microjansky Source Counts and Spectral Indices at 8.44 GHz / R. A. Windhorst [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 1993. — март. — т. 405. — с. 498. — DOI: 10.1086/172382.

96. Spectral index properties of milliJansky radio sources / K. E. Randall [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2012. — апр. — т. 421, № 2. — с. 1644—1660. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.20422.x. — arXiv: 1201.0568 [astro-ph.CO].
97. *Dabhade P., Gopal-Krishna.* The spectral index-flux density relation for extragalactic radio sources selected at metre and decametre wavelengths // Astronomy and Astrophysics. — 2023. — июль. — т. 675. — с. L3. — DOI: 10.1051/0004-6361/202346593. — arXiv: 2306.11205 [astro-ph.GA].
98. *Zhelenkova O. P., Majorova E. K.* Study of RCR Catalogue Radio Source Integral Spectra // Astrophysical Bulletin. — 2018. — апр. — т. 73, № 2. — с. 142—161. — DOI: 10.1134/S1990341318020037. — arXiv: 1805.05656 [astro-ph.GA].
99. *Laing R. A., Peacock J. A.* The relation between radio luminosity and spectrum for extended extragalactic radio sources. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1980. — март. — т. 190. — с. 903—924. — DOI: 10.1093/mnras/190.4.903.
100. *Gorshkov A. G., Konnikova V. K., Mingaliev M. G.* Flux density variability of radio sources at declinations 10° – $12^{\circ}30'$ (J2000) on time scales less than a month // Astronomy Reports. — 2013. — май. — т. 57, № 5. — с. 344—365. — DOI: 10.1134/S1063772913040057.
101. The WISE Blazar-like Radio-loud Sources: An All-sky Catalog of Candidate γ -ray Blazars / R. D’Abrusco [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2014. — нояб. — т. 215, № 1. — с. 14. — DOI: 10.1088/0067-0049/215/1/14. — arXiv: 1410.0029 [astro-ph.HE].
102. *Pacholczyk A. G.* Radio astrophysics. Nonthermal processes in galactic and extragalactic sources. — San Francisco, "W.H.Freeman", 1970.
103. A new sample of faint Gigahertz Peaked Spectrum radio sources / I. A. G. Snellen [и др.] // Astronomy & Astrophysics Supplement. — 1998. — сент. — т. 131. — с. 435—449. — DOI: 10.1051/aas:1998281. — eprint: arXiv: astro-ph/9803140.

104. *Bicknell G. V., Dopita M. A., O'Dea C. P.* Unification of the Radio and Optical Properties of Gigahertz Peak Spectrum and Compact Steep-Spectrum Radio Sources // *Astronomical Journal*. — 1997. — авг. — т. 485. — с. 112—124. — DOI: 10.1086/304400.
105. *O'Dea C. P., Baum S. A.* Constraints on Radio Source Evolution from the Compact Steep Spectrum and GHz Peaked Spectrum Radio Sources // *Astronomical Journal*. — 1997. — янв. — т. 113. — с. 148—161. — DOI: 10.1086/118241.
106. On the nature of compact steep spectrum radio sources. / R. Fanti [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 1990. — май. — т. 231. — с. 333—346.
107. *Blake G. M.* Observations of Extragalactic Radio Sources Having Unusual Spectra // *Astrophysical Letters*. — 1970. — июль. — т. 6. — с. 201.
108. *Phillips R. B., Mutel R. L.* On symmetric structure in compact radio sources. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1982. — февр. — т. 106. — с. 21—24.
109. *Peacock J. A., Wall J. V.* Bright extragalactic radio sources at 2.7 GHz - I. The northern hemisphere catalogue. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1981. — янв. — т. 194. — с. 331—349. — DOI: 10.1093/mnras/194.2.331.
110. *Peacock J. A., Wall J. V.* Bright extragalactic radio sources at 2.7 GHz- II. Observations with the Cambridge 5-km telescope. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1982. — март. — т. 198. — с. 843—860. — DOI: 10.1093/mnras/198.3.843.
111. *Hodges M. W., Mutel R. L., Phillips R. B.* A VLBI survey of peaked-spectrum radio sources. // *Astronomical Journal*. — 1984. — сент. — т. 89. — с. 1327—1331. — DOI: 10.1086/113631.
112. *Mutel R. L., Phillips R. B.* The Evolution of Compact Double Radio Sources // *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*. т. 129 / под ред. М. J. Reid, J. M. Moran. — 01.1988. — с. 73. — (IAU Symposium).

113. *O’Dea C. P., Saikia D. J.* Compact steep-spectrum and peaked-spectrum radio sources // *The Astronomy & Astrophysics Review*. — 2021. — дек. — т. 29, № 1. — с. 3. — DOI: 10.1007/s00159-021-00131-w. — arXiv: 2009.02750 [astro-ph.GA].
114. The radio spectral turnover of radio-loud quasars at $z > 5$ / Y. Shao [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — март. — т. 659. — A159. — DOI: 10.1051/0004-6361/202142489. — arXiv: 2112.03133 [astro-ph.GA].
115. High Frequency Peakers: Young radio sources or flaring blazars? / S. Tinti [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — март. — т. 432, № 1. — с. 31—43. — DOI: 10.1051/0004-6361:20041620. — arXiv: astro-ph/0410663 [astro-ph].
116. High frequency peakers. I. The bright sample / D. Dallacasa [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2000. — нояб. — т. 363. — с. 887—900. — arXiv: astro-ph/0012428 [astro-ph].
117. *Stanghellini C., Dallacasa D., Orienti M.* High Frequency Peakers: The faint sample // *Astronomische Nachrichten*. — 2009. — февр. — т. 330, № 2. — с. 223. — DOI: 10.1002/asna.200811162. — arXiv: 0901.3068 [astro-ph.CO].
118. Are compact steep-spectrum sources young? / C. Fanti [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 1995. — окт. — т. 302. — с. 317.
119. The Evolution of Extragalactic Radio Sources / A. C. S. Readhead [и др.] // *Extragalactic Radio Sources*. т. 175 / под ред. R. D. Ekers, C. Fanti, L. Padrielli. — 01.1996. — с. 88. — (IAU Symposium).
120. *V’eron-Cetty M. -P., V’eron P.* A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition // *Astronomy & Astrophysics*. — 2010. — июль. — т. 518. — A10. — DOI: 10.1051/0004-6361/201014188.
121. *O’Dea C. P.* Do quasars with radio spectra peaked at gigahertz frequencies have extremely high redshifts? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1990. — июль. — т. 245. — 20P.

122. High-redshift quasars at $z \geq 3$ - I. Radio spectra / Y. Sotnikova [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — дек. — т. 508, № 2. — с. 2798–2814. — DOI: 10.1093/mnras/stab2114. — arXiv: 2109.14029 [astro-ph.GA].
123. VLBA images of high frequency peakers / M. Orienti [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2006. — май. — т. 450, № 3. — с. 959–970. — DOI: 10.1051/0004-6361:20054656. — arXiv: astro-ph/0602158 [astro-ph].
124. Verkhodanov O. V., Trushkin S. A., Chernenkov V. N. Cats : a Database System of Astrophysical Catalogs // Baltic Astronomy. — 1997. — март. — т. 6. — с. 275–278. — DOI: 10.1515/astro-1997-0224.
125. Current status of the CATS database. / O. V. Verkhodanov [и др.] // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 2005. — май. — т. 58. — с. 118–129. — DOI: 10.48550/arXiv.0705.2959. — arXiv: 0705.2959 [astro-ph].
126. Gregory P. C., Condon J. J. The 87GB Catalog of Radio Sources Covering $0^\circ < \delta < +75^\circ$ at 4.85 GHz // The Astrophysical Journal Supplement. — 1991. — апр. — т. 75. — с. 1011. — DOI: 10.1086/191559.
127. A Catalog of 1.4 GHz Radio Sources from the FIRST Survey / R. L. White [и др.] // The Astrophysical Journal. — 1997. — февр. — т. 475, № 2. — с. 479–493. — DOI: 10.1086/303564.
128. The second epoch Molonglo Galactic Plane Survey: compact source catalogue / T. Murphy [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2007. — нояб. — т. 382, № 1. — с. 382–392. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.12379.x. — arXiv: 0708.3092 [astro-ph].
129. Multifrequency study of GHz-peaked spectrum sources and candidates with the RATAN-600 radio telescope / M. G. Mingaliev [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2012. — авг. — т. 544. — A25. — DOI: 10.1051/0004-6361/201118506.
130. The GMRT 150 MHz all-sky radio survey. First alternative data release TGSS ADR1 / H. T. Intema [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2017. — февр. — т. 598. — A78. — DOI: 10.1051/0004-6361/201628536. — arXiv: 1603.04368 [astro-ph.CO].

131. Multifrequency Study of GHz-peaked Spectrum Sources / Y. V. Sotnikova [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2019. — окт. — т. 74, № 4. — с. 348—364. — DOI: 10.1134/S1990341319040023. — arXiv: 1911.12769 [astro-ph.GA].
132. High-Redshift Quasars at $z > 3$: Radio Variability and MPS/GPS Candidates / Y. Sotnikova [и др.] // *Galaxies*. — 2024. — май. — т. 12, № 3. — с. 25. — DOI: 10.3390/galaxies12030025. — arXiv: 2406.01458 [astro-ph.GA].
133. The absolute spectrum of Cas A: an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators. / J. W. M. Baars [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 1977. — окт. — т. 61. — с. 99—106.
134. *Lomb N. R.* Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data // *Astrophysics and Space Science*. — 1976. — февр. — т. 39, № 2. — с. 447—462. — DOI: 10.1007/BF00648343.
135. *Scargle J. D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. // *Astrophysical Journal*. — 1982. — дек. — т. 263. — с. 835—853. — DOI: 10.1086/160554.
136. *Zechmeister M., Kürster M.* The generalised Lomb-Scargle periodogram. A new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms // *Astronomy & Astrophysics*. — 2009. — март. — т. 496, № 2. — с. 577—584. — DOI: 10.1051/0004-6361/200811296. — arXiv: 0901.2573 [astro-ph.IM].
137. *Walker M. A.* Interstellar scintillation of compact extragalactic radio sources // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1998. — февр. — т. 294. — с. 307—311. — DOI: 10.1046/j.1365-8711.1998.01238.x10.1111/j.1365-8711.1998.01238.x.
138. Refractive Interstellar Scintillation of Extra-galactic Radio Sources I: Expectations / P. J. Hancock [и др.] // arXiv e-prints. — 2019. — июль. — arXiv:1907.08395. — DOI: 10.48550/arXiv.1907.08395. — arXiv: 1907.08395 [astro-ph.GA].
139. *Kellermann K. I., Owen F. N.* Radio galaxies and quasars. // *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy* / под ред. К. I. Kellermann, G. L. Verschuur. — Berlin, New York, Springer-Verlag, 1988. — с. 563—602.

140. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y.* Milky Way scattering properties and intrinsic sizes of active galactic nuclei cores probed by very long baseline interferometry surveys of compact extragalactic radio sources // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2015. — окт. — т. 452, № 4. — с. 4274–4282. — DOI: 10.1093/mnras/stv1539. — arXiv: 1507.02459 [astro-ph.HE].
141. Tracing Milky Way scattering by compact extragalactic radio sources / Т. А. Koryukova [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — сент. — т. 515, № 2. — с. 1736–1750. — DOI: 10.1093/mnras/stac1898. — arXiv: 2201.04359 [astro-ph.GA].
142. The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources / R. C. Hartman [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1999. — июль. — т. 123, № 1. — с. 79–202. — DOI: 10.1086/313231.
143. Explanatory Supplement to the WISE All-Sky Data Release Products / R. M. Cutri [и др.]. — 03.2012. — Explanatory Supplement to the WISE All-Sky Data Release Products.
144. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) / M. F. Skrutskie [и др.] // The Astronomical Journal. — 2006. — февр. — т. 131, № 2. — с. 1163–1183. — DOI: 10.1086/498708.
145. *Fan J. H., Xie G. Z., Wen S. L.* The relativistic beaming model for active galactic nuclei. // Astronomy & Astrophysics Supplement. — 1996. — май. — т. 116. — с. 409–415.
146. Multiepoch Very Long Baseline Array Observations of EGRET-detected Quasars and BL Lacertae Objects: Superluminal Motion of Gamma-Ray Bright Blazars / S. G. Jorstad [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2001. — июнь. — т. 134, № 2. — с. 181–240. — DOI: 10.1086/320858. — arXiv: astro-ph/0101570 [astro-ph].
147. The Fastest Relativistic Jets: VLBA Observations of Blazars with Apparent Speeds Exceeding $25c$ / B. G. Piner [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2006. — март. — т. 640, № 1. — с. 196–203. — DOI: 10.1086/500006. — arXiv: astro-ph/0511664 [astro-ph].

148. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz within the VLBA-BU-BLAZAR Program / S. G. Jorstad [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2017. — сент. — т. 846, № 2. — с. 98. — DOI: 10.3847/1538-4357/aa8407. — arXiv: 1711.03983 [astro-ph.GA].
149. The extreme blazar AO 0235+164 as seen by extensive ground and space radio observations / A. M. Kutkin [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — апр. — т. 475, № 4. — с. 4994–5009. — DOI: 10.1093/mnras/sty144. — arXiv: 1801.04892 [astro-ph.GA].
150. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies / T. Hovatta [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2009. — февр. — т. 494, № 2. — с. 527–537. — DOI: 10.1051/0004-6361:200811150. — arXiv: 0811.4278 [astro-ph].
151. Variations of the Blazar AO 0235+164 in 2006-2015 / V. A. Hagen-Thorn [и др.] // Astronomy Reports. — 2018. — февр. — т. 62, № 2. — с. 103–115. — DOI: 10.1134/S106377291802004X.
152. Correlation between optical and *gamma*-ray flux variations in BL Lacs / B. Rajput [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — июнь. — т. 504, № 2. — с. 1772–1786. — DOI: 10.1093/mnras/stab970. — arXiv: 2104.00402 [astro-ph.HE].
153. Wang Y.-F., Jiang Y.-G. A Comprehensive Study on the Variation Phenomena of AO 0235+164 // The Astrophysical Journal. — 2020. — окт. — т. 902, № 1. — с. 41. — DOI: 10.3847/1538-4357/abb36c. — arXiv: 2009.00879 [astro-ph.HE].
154. Optical and radio variability of the BL Lacertae object <ASTROBJ>AO 0235+16</ASTROBJ>: A possible 5-6 year periodicity / C. M. Raiteri [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2001. — окт. — т. 377. — с. 396–412. — DOI: 10.1051/0004-6361:20011112. — eprint: astro-ph/0108165.
155. Optical periodicity analysis for radio selected BL Lacertae objects (RBLs) / J. H. Fan [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2002. — янв. — т. 381. — с. 1–5. — DOI: 10.1051/0004-6361:20011356.

156. Multiwavelength periodicity search in a sample of γ -ray bright blazars / J. Otero-Santos [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — февр. — т. 518, № 4. — с. 5788—5807. — DOI: 10.1093/mnras/stac3142. — arXiv: 2210.16327 [astro-ph.HE].
157. Multifrequency variability of the blazar AO 0235+164. The WEBT campaign in 2004-2005 and long-term SED analysis / C. M. Raiteri [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2006. — дек. — т. 459, № 3. — с. 731—743. — DOI: 10.1051/0004-6361:20065744. — arXiv: astro-ph/0608627 [astro-ph].
158. Detection of a quasi-periodic oscillation in the optical light curve of the remarkable blazar AO 0235+164 / A. Roy [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — июль. — т. 513, № 4. — с. 5238—5244. — DOI: 10.1093/mnras/stac1287. — arXiv: 2205.03586 [astro-ph.HE].
159. *Romero G. E., Fan J.-H., Nuza S. E.* The Binary Black Hole Scenario for the BL Lacertae Object AO~0235+16 // Chinese Journal of Astronomy & Astrophysics. — 2003. — дек. — т. 3, № 6. — с. 513—525. — DOI: 10.1088/1009-9271/3/6/513. — arXiv: astro-ph/0312197 [astro-ph].
160. *Ostorero L., Villata M., Raiteri C. M.* Helical jets in blazars. Interpretation of the multifrequency long-term variability of AO 0235+16 // Astronomy & Astrophysics. — 2004. — июнь. — т. 419. — с. 913—925. — DOI: 10.1051/0004-6361:20035813. — arXiv: astro-ph/0402551 [astro-ph].
161. Physical characteristics of the Blazar AO 0235+164 / A. E. Vol'vach [и др.] // Astronomy Reports. — 2015. — февр. — т. 59, № 2. — с. 145—155. — DOI: 10.1134/S1063772914120117.
162. VSOP Monitoring of the Compact BL Lac Object AO 0235+164 / S. Frey [и др.] // Proceedings of the Astronomical Society of Australia, Proceedings. — 2006. — апр. — т. 58. — с. 217—222. — DOI: 10.1093/pasj/58.2.217. — arXiv: astro-ph/0509528 [astro-ph].
163. A near magnetic-to-kinetic energy equipartition flare from the relativistic jet in AO 0235 + 164 during 2013-2019 / W. Y. Cheong [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2024. — янв. — т. 527, № 1. — с. 882—894. — DOI: 10.1093/mnras/stad3250. — arXiv: 2310.16296 [astro-ph.HE].

164. The 1997 Outburst of AO 0235+164: Evidence for a Microlensing Event? / J. R. Webb [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 2000. — июль. — т. 120, № 1. — с. 41–46. — DOI: 10.1086/301432.
165. Search for intraday radio variability in EGRET blazars. / G. E. Romero [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 1997. — окт. — т. 326. — с. 77–86.
166. *Peng B., de Bruyn A. G.* Evidence for Microarcsecond Structure in the BL Lacertae Object AO 0235+164 // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — июль. — т. 610, № 1. — с. 151–155. — DOI: 10.1086/421485.
167. The Outburst of the Blazar AO 0235+164 in 2006 December: Shock-in-Jet Interpretation / V. A. Hagen-Thorn [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — янв. — т. 672, № 1. — с. 40–47. — DOI: 10.1086/523841. — arXiv: 0709.3550 [astro-ph].
168. Multi-wavelength Observations of Blazar AO 0235+164 in the 2008-2009 Flaring State / M. Ackermann [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — июнь. — т. 751, № 2. — с. 159. — DOI: 10.1088/0004-637X/751/2/159. — arXiv: 1207.2932 [astro-ph.HE].
169. *Wang H.* The optical periodic analysis of BL Lac object AO 0235+164 // *Astrophysics and Space Science*. — 2014. — май. — т. 351, № 1. — с. 281–287. — DOI: 10.1007/s10509-014-1840-z.
170. The WEBT campaign to observe AO 0235+16 in the 2003-2004 observing season. Results from radio-to-optical monitoring and XMM-Newton observations / C. M. Raiteri [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — июль. — т. 438, № 1. — с. 39–53. — DOI: 10.1051/0004-6361:20042567. — arXiv: astro-ph/0503312 [astro-ph].
171. Radio-to-UV monitoring of AO 0235+164 by the WEBT and Swift during the 2006-2007 outburst / C. M. Raiteri [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — март. — т. 480, № 2. — с. 339–347. — DOI: 10.1051/0004-6361:20079044. — arXiv: 0801.1236 [astro-ph].
172. Multiwavelength variability of the blazar AO 0235+164 / V. V. Vlasyuk [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — дек. — т. 535, № 3. — с. 2775–2799. — DOI: 10.1093/mnras/stae2491. — arXiv: 2411.01497 [astro-ph.HE].

