

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(САО РАН)



Научная квалификационная работа
«Исследование внегалактических источников в обзорах неба на РАТАН-600»

Аспирант Кудряшова А. А.
Научный руководитель к.ф.-м.н. Бурсов Н. Н.
Лаборатория радиоастрофизики

Направление 03.06.01 Физика и астрономия
Профиль 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

Нижний Архыз 2024

Цели и задачи

Цель работы: обнаружение и исследование объектов в длительных обзорах неба на РАТАН-600.

Задачи:

- проведение обзоров на Западном секторе РАТАН-600 на разных склонениях;
- разработка методов, программного обеспечения и обработка обзоров на Западном и Северном секторах РАТАН-600;
- формирование каталогов и отождествление обнаруженных радиоисточников обзоров;
- исследование источников обзоров: поиск переменности излучения, построение и анализ радиоспектров источников, анализ физических и статистических параметров выборок объектов.

Актуальность

Активные ядра галактик (АЯГ) являются объектами интенсивного изучения. Одним из инструментов изучения АЯГ является исследование переменности их излучения во всех диапазонах. В обзорах на РАТАН-600 получены уникальные ежедневные наблюдательные данные сотен слабых радиоисточников ($S_{\nu} > 3$ мЯн) за периоды времени от нескольких месяцев до года на разных частотах.

Исследование переменности данных объектов вносит значимый вклад в изучение физической природы радиоизлучения АЯГ.

Структура работы

Введение

Глава 1. Методика обработки обзоров неба на РАТАН-600

1.1 Методика наблюдений и обработки обзоров в режиме перестановки антенны на Северном секторе РАТАН-600 ($Az=0^\circ$)

1.2 Методика наблюдений и обработки обзоров в режиме неподвижной антенны на Западном секторе ($Az=270^\circ$)

Глава 2. Исследование источников обзоров неба на РАТАН-600

2.1 Источники обзора на Северном секторе на 1.4, 2.7 и 6.25 см

2.2 Источники обзоров на Западном секторе на 6.38 см

Глава 3. Исследование блазара АО 0235+164

3.1 Мониторинг излучения блазара на 6.38 и 13.3 см

3.2 Исследование свойств нетеплового излучения источника

Заключение

Литература

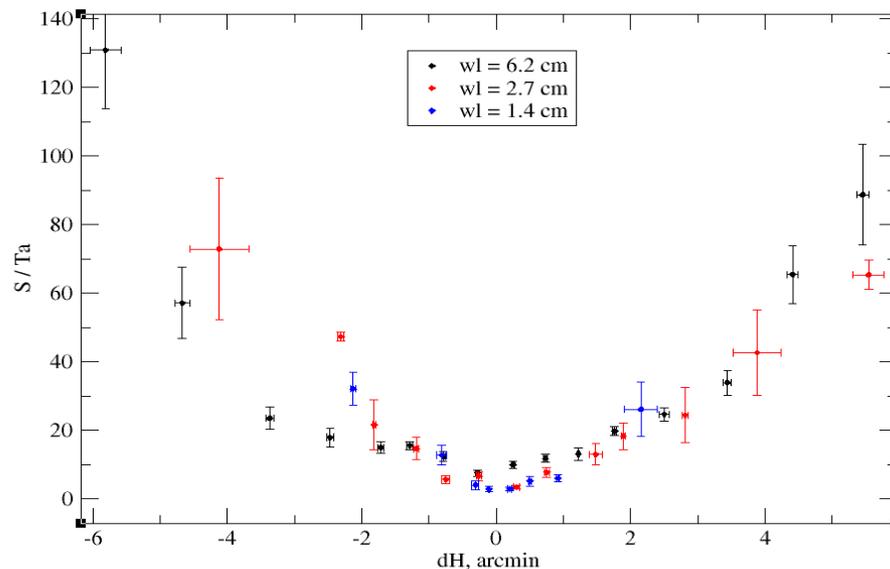
Приложение

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

Приемно-измерительный комплекс «Облучатель №2»



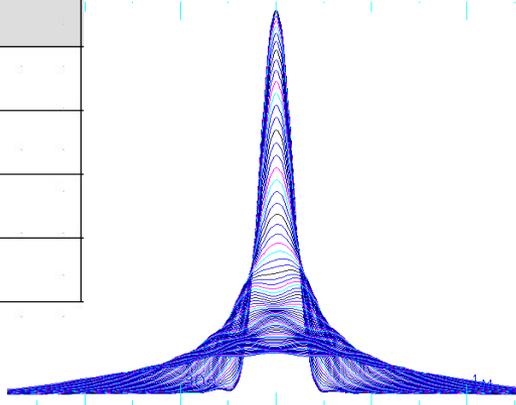
calibration curve
Eridan2, 2011-2012, N



Характеристики радиометров «Эридан-2»

f_0 (GHz)	Δf_0 (GHz)	ΔF (mJy/beam)	HPBW _x sec
30	5.0	200	1.1
22.3	2.5	95	1.5
11.2	1.0	30	2.1
4.7	0.6	10	4.8

Расчётные сечения диаграммы направленности на высоте источника ЗС84 ($H=88^\circ$)



Трёх-частотный радиометрический комплекс «Эридан-2»



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

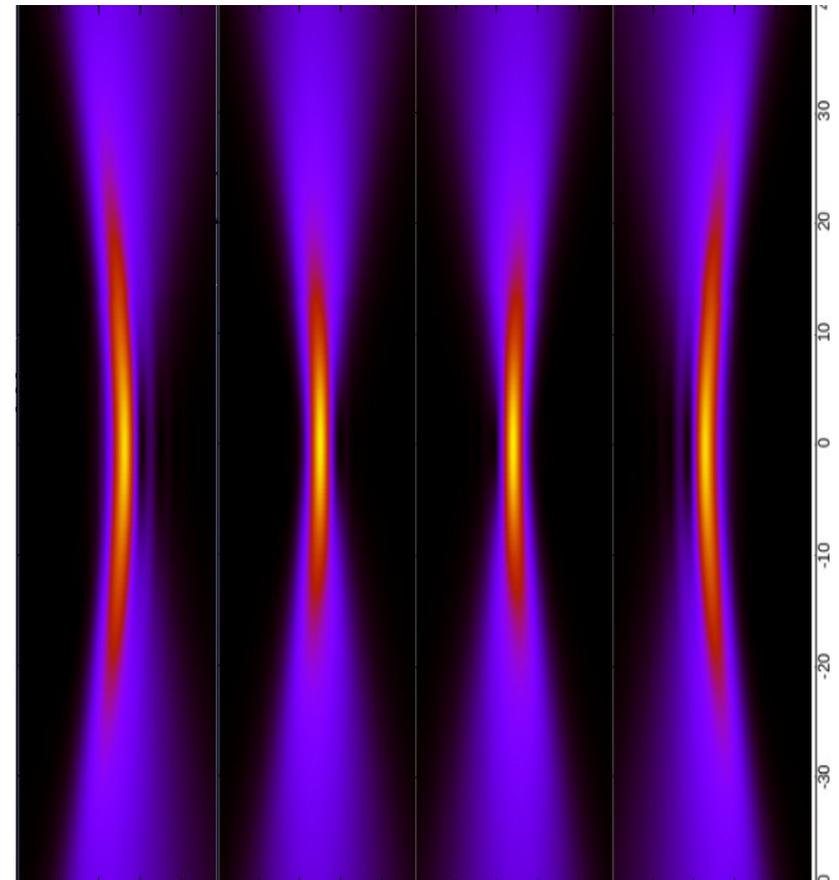
Комплекс радиометров на частоте 4.7 ГГц.



Расчетная диаграмма для 4-х лучей с учетом аббераций.

Четыре 4-х канальных радиометра: 4.7 ГГц,
ширина полосы 600 МГц (4x150МГц),
Дискрет считывания: 0.25 мс
Чувствительность 3 мК за 1 сек; $A_{эфф} \sim 1000 \text{ м}^2$
Поле зрения луча 35' x 1.1'

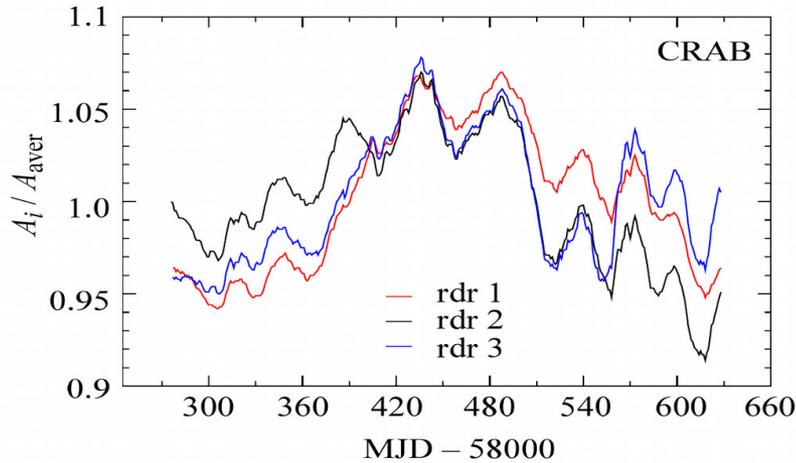
f_0 (GHz)	Δf_0 (GHz)	ΔF (mJy/beam)	HPBWx sec
4.40-4.55	0.15	10	3.2
4.55-4.70	0.15	10	3.2
4.70-4.85	0.15	10	3.2
4.85-5.00	0.15	10	3.2
2.21-2.29	0.15	40	7.2



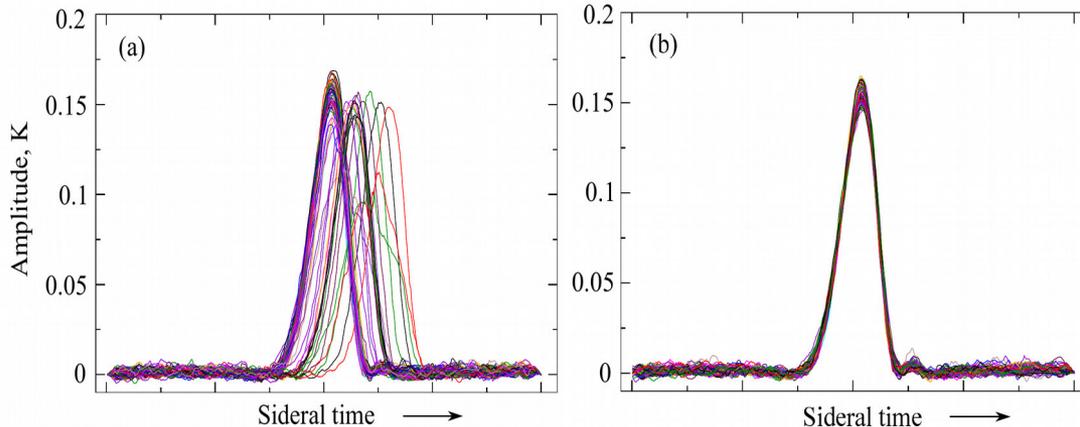
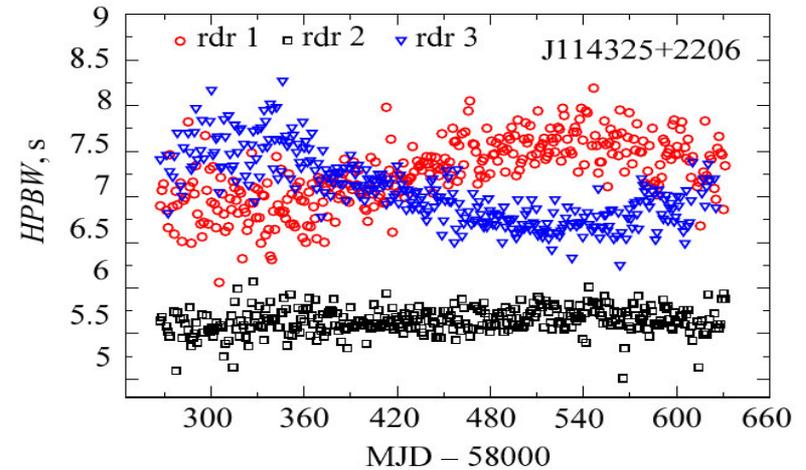
Глава 1. Методика наблюдений и обработки обзоров неба на РАТАН-600

Источники обзора на склонении Крабовидной туманности (Dec = +22°)

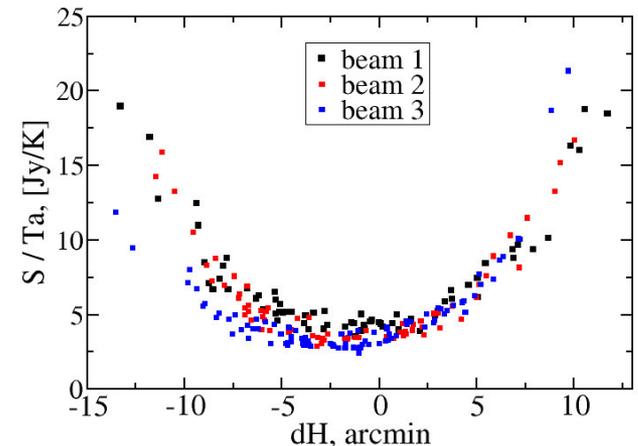
Привязка амплитуды источников за изменение усиления радиометров за год



Привязка амплитуды и положения источников за изменение их полуширины



Пример коррекции яркого источника по амплитуде и положению



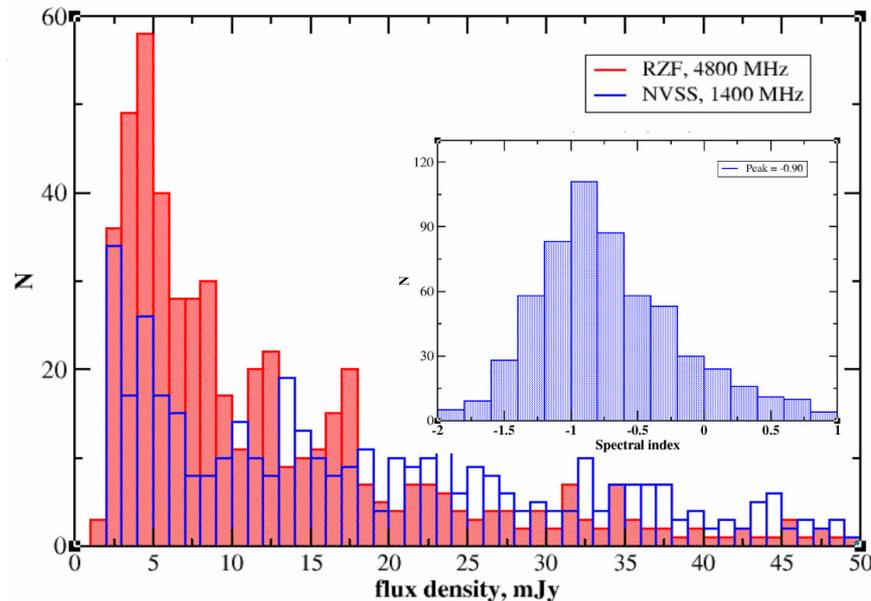
Калибровочная кривая $S/Ta \sim f(dN)$

Глава 2. Каталоги и исследование источников обзоров неба на РАТАН-600

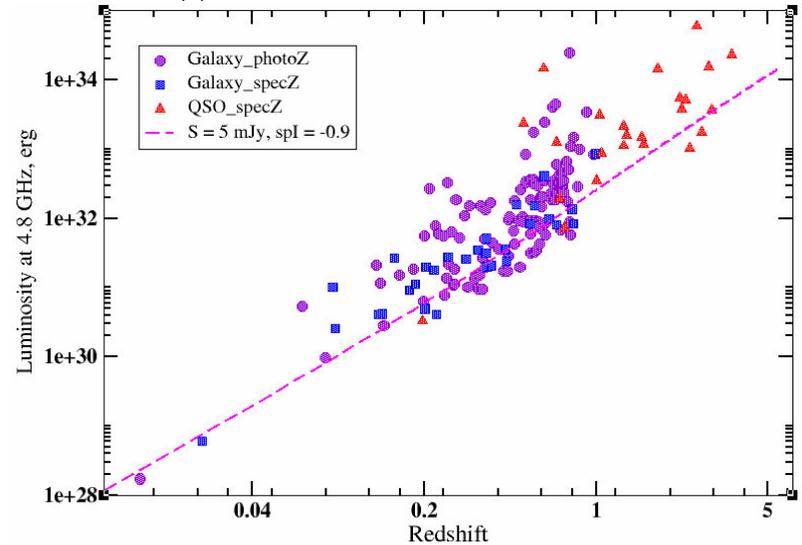
Исследование источников обзора на склонении ЗС84 (Dec = +41.°5)

$$L_\nu = \frac{4 \pi D_l^2 \nu S_\nu}{(1+z)^{(\alpha+1)}}$$

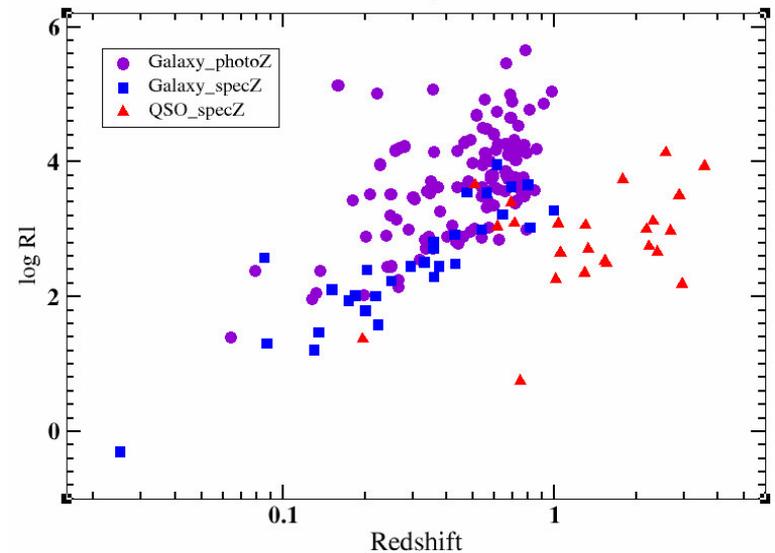
$$R = \frac{S_{4.8} \cdot (1+z)^{-(1+\alpha)}}{S_g \cdot (1+z)^{-(1+\alpha)}}$$



Радиосветимость источников

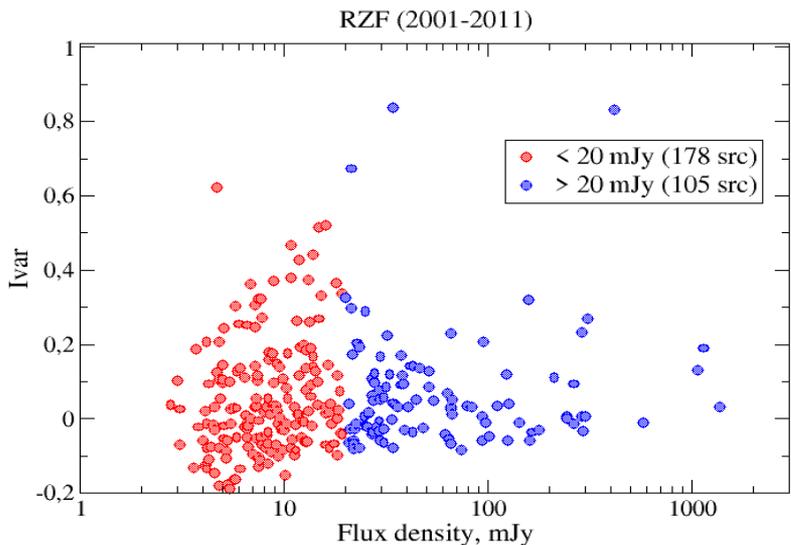


Радиогромкость источников

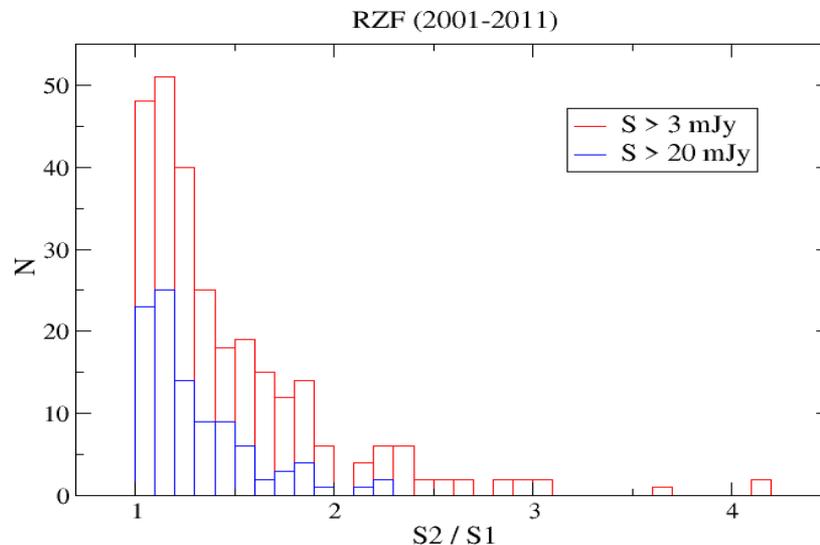


Глава 2. Каталоги и исследование источников обзоров неба на РАТАН-600

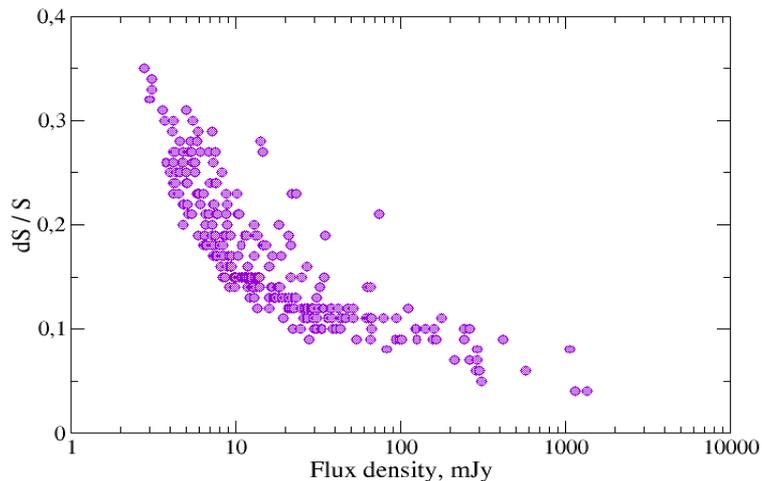
Индекс переменности источников обзоров на Северном секторе



Переменность плотности потока за 10 лет наблюдений



Относительная ошибка измерений плотности потока источников



$$I_{\text{var}} = \frac{(A_{\text{max}} - \sigma_{A_{\text{max}}}) - (A_{\text{min}} + \sigma_{A_{\text{min}}})}{(A_{\text{max}} - \sigma_{A_{\text{max}}}) + (A_{\text{min}} + \sigma_{A_{\text{min}}})}$$

NVSS J042746+413300 (B3 0424+414)

$S_v = 418 \text{ mJy}$, $S_2/S_1 = 12$ – кандидат в блазары

NVSS J130523+412953 (B3 1303+417)

$S_v = 34 \text{ mJy}$, $S_2/S_1 = 15$ – нет информации

NVSS J215715+413022

$S_v = 22 \text{ mJy}$, $S_2/S_1 = 6.5$ – нет информации

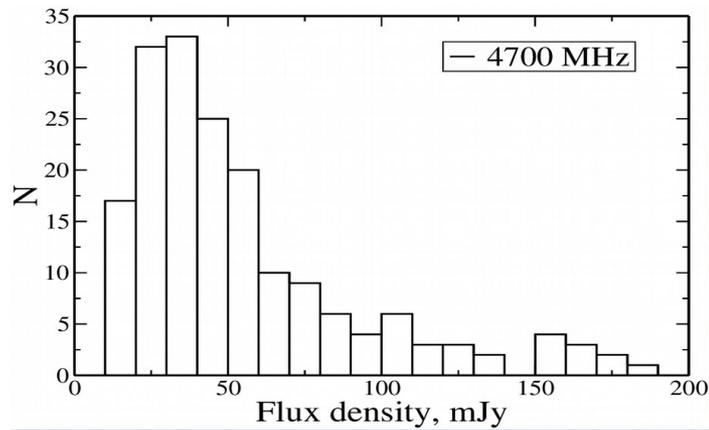
Bursov, et. al., 2007. A RATAN-600 Zenith-Field sky survey. Catalog of radio sources. \ Astronomy Reports 51, 197–214.

doi:10.1134/S106377290703002X

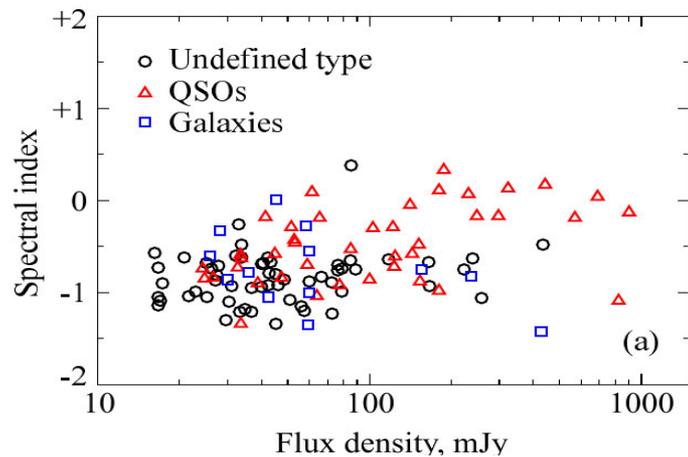
Глава 2. Каталоги и исследование источников обзоров неба на РАТАН-600

Исследование источников на Западном секторе

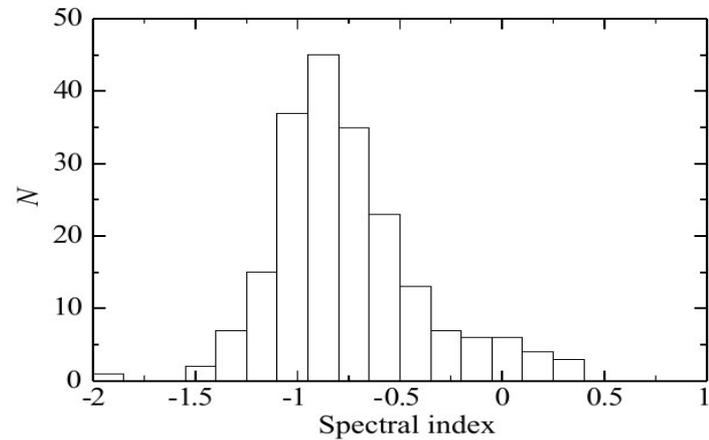
Плотности потока выборки 205 источников на частоте 4.7 ГГц.



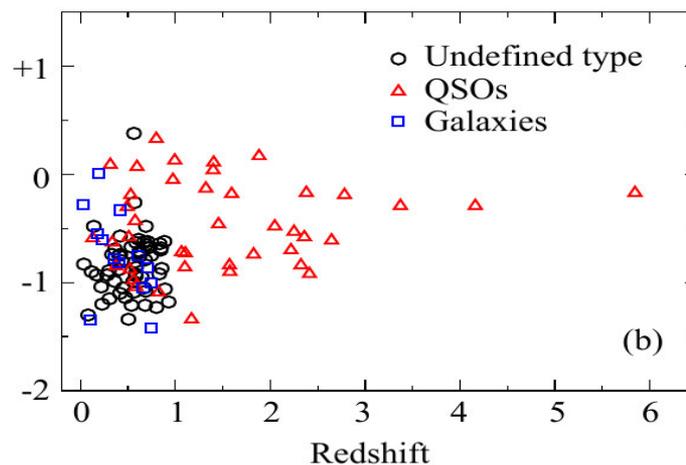
Зависимость спектральных индексов от плотности потока.



Спектральные индексы источников выборки.

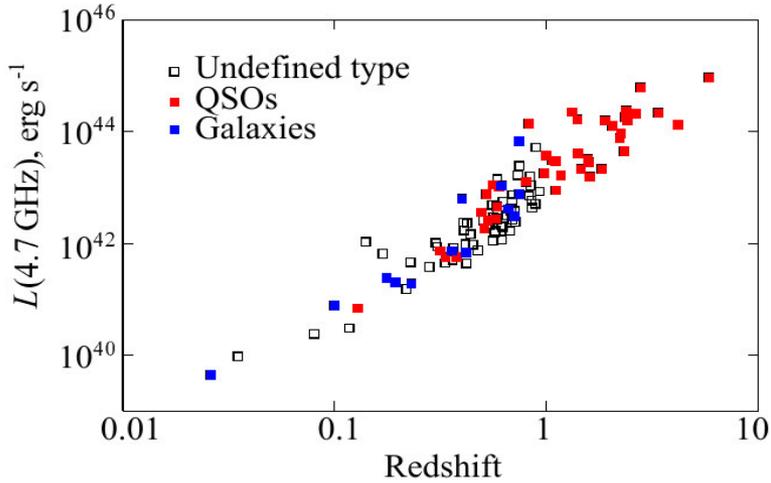


Зависимость спектральных индексов от красного смещения.

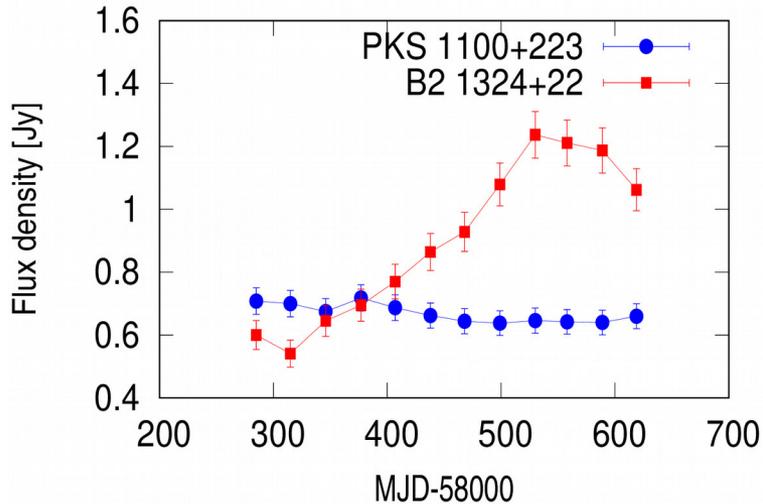


Глава 2. Каталоги и исследование источников обзоров неба на РАТАН-600

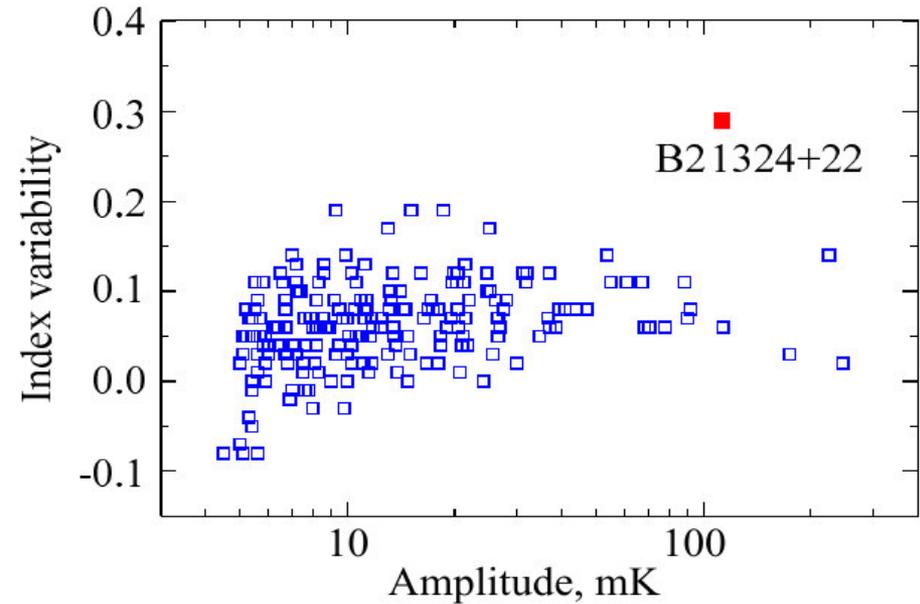
Светимость источников на частоте 4.7 ГГц в зависимости от красного смещения.



Блазар B2 1324+22 на 4.7 ГГц ($z = 1.4$)

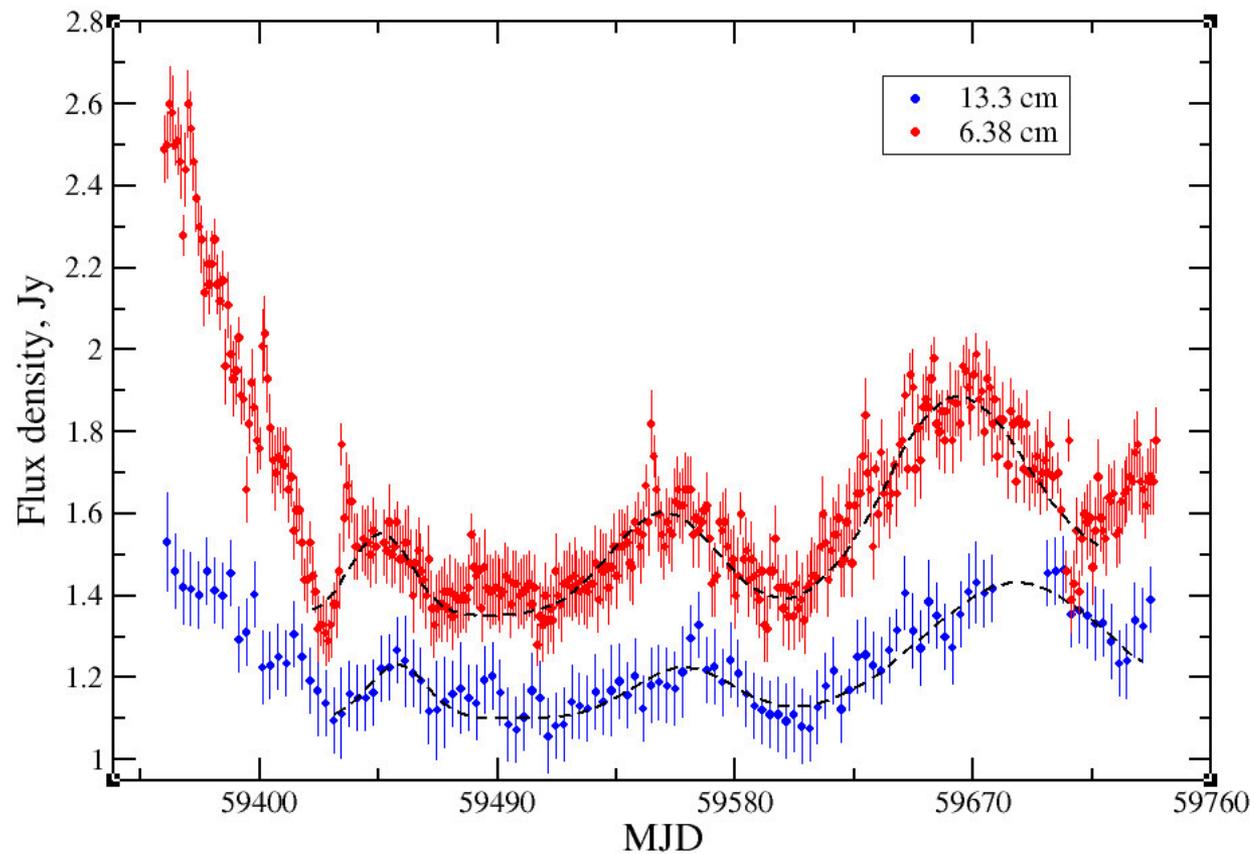


Индексы переменности
205 источников на 4.7 ГГц



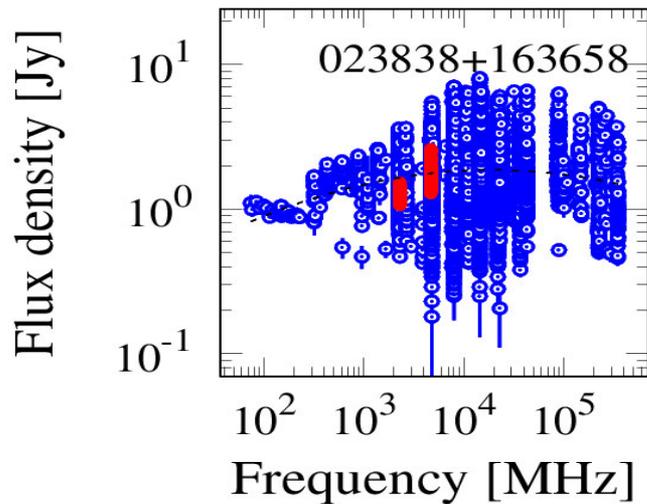
Глава 3. Исследование блазара АО 0235+164

Кривые блеска по данным обзора на 2 и 5 ГГц за 2021-2022 гг.

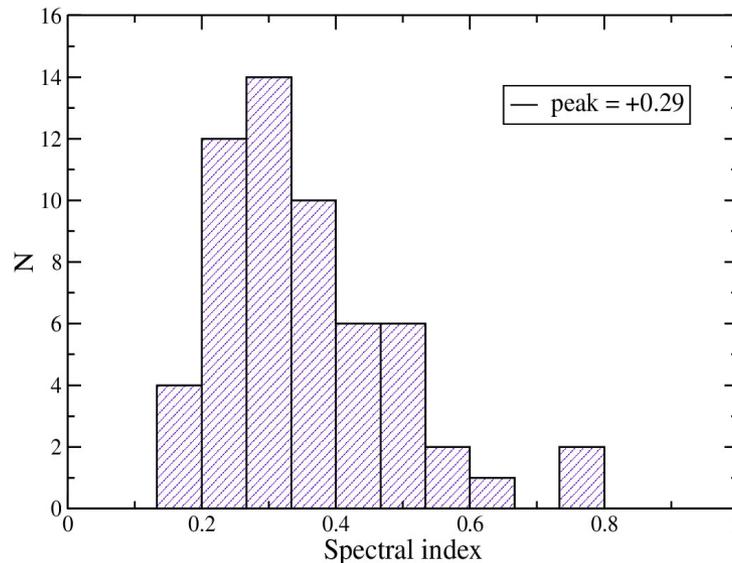


Глава 3. Исследование блазара АО 0235+164

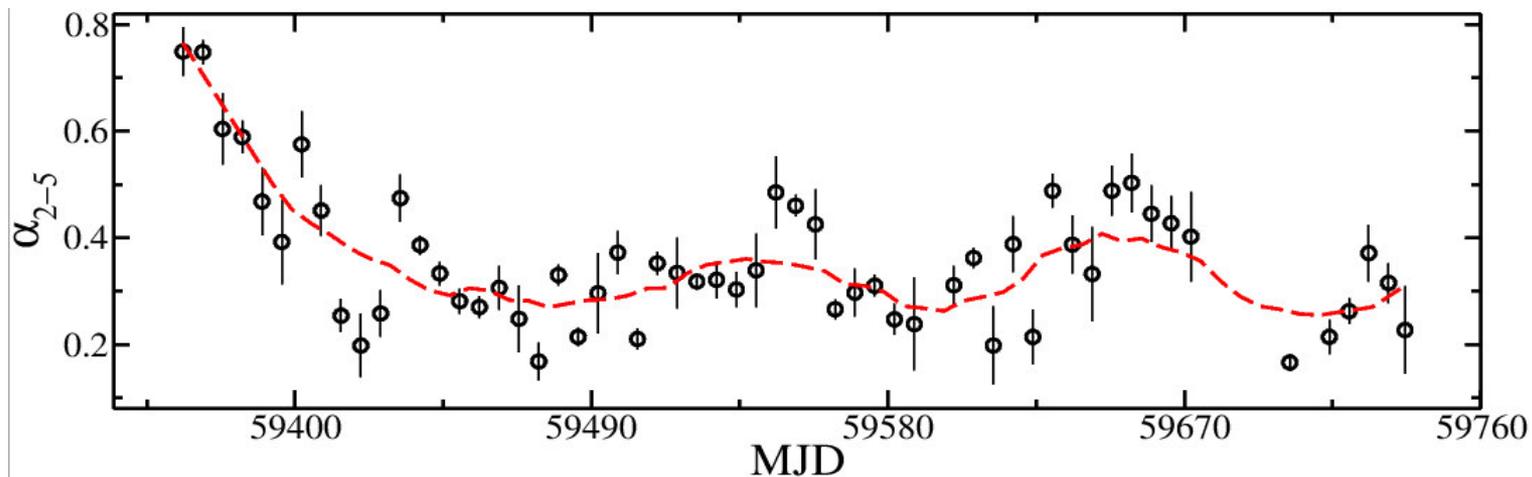
Радиоспектр объекта АО 0235+164.



Распределение сп. индексов за год.

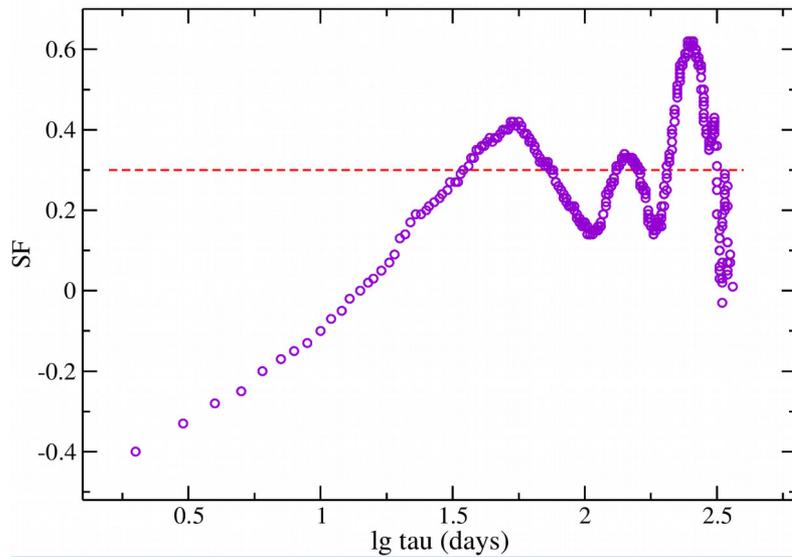


Эволюция спектрального индекса за год наблюдений.

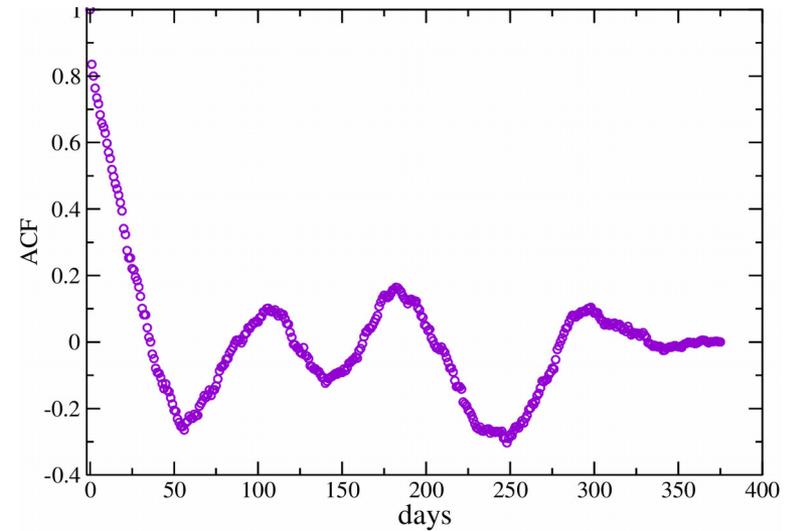


Глава 3. Исследование блазара АО 0235+164

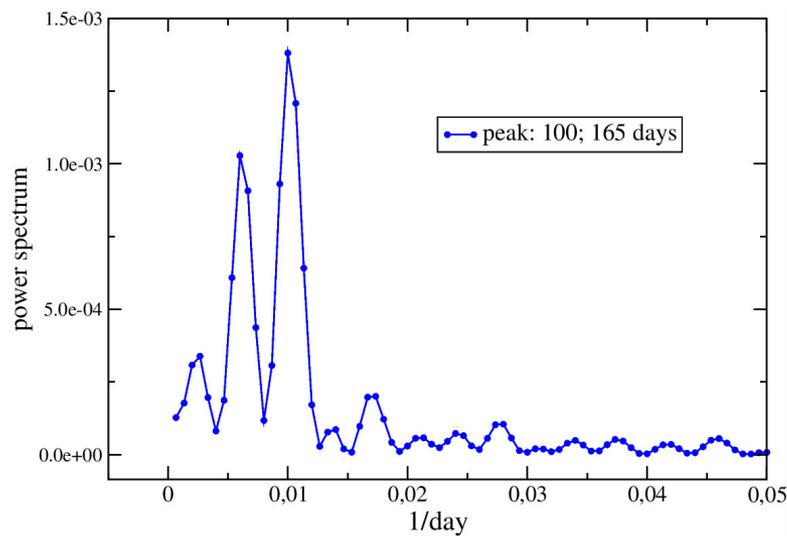
Структурная функция АО0235+164.



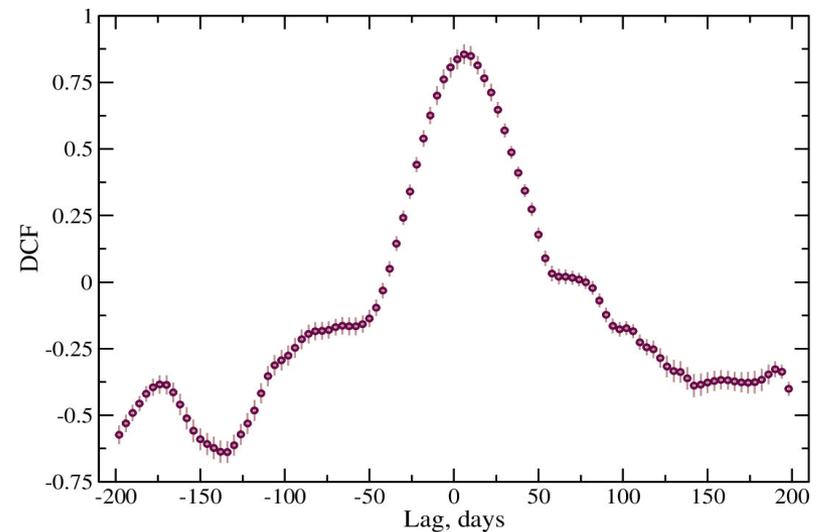
Автокорреляционная функция.



Периодограмма L-S.



DCF корреляция между 2 и 5 ГГц.



Заключение

1. В результате обработки обзора на Северном секторе, проведённого в 2011-12 гг. на 3-х частотном комплексе Эридан-2, получен список 760 источников в области неба $R.A.=0-24h$, $Dec=41^{\circ}.5$ на длине волны 6.25 см. Минимальная плотность потока составила 3 мЯн, полнота каталога > 10 мЯн. Число обнаруженных источников на коротких волнах: 117 на длине волны 1.38 см и 139 на 2.7 см.
2. Проведены обзоры на Западном секторе РАТАН-600. Для полученных данных разработаны алгоритмы, программное обеспечение и обработаны данные непрерывных наблюдений на склонении Крабовидной туманности. Получен список наиболее ярких 205 источников указанного обзора за 2018-2019 гг.
3. Все источники отождествлены с радиоданными базы данных CATS и 85% с источниками оптических каталогов SDSS (DR16), Gaia (DR3), Pan-STARRS, 2MASS и баз данных SIMBAD, NED, Roma-BZCAT
Обнаруженные источники в основном относятся к квазарам и галактикам различных типов. Для всех источников построены радиоспектры, для четверти из которых впервые в высокочастотной области спектра ($\nu \geq 4.7$ ГГц).

Заключение

4. В обзоре на склонении Крабовидной туманности для 205 источников рассчитаны индексы переменности, а для наиболее сильных источников ($S_v > 15$ мЯн) построены структурные и автокорреляционные функции для оценки переменности излучения источников на масштабах времени одного года.

Увеличение плотности потока излучения в два раза обнаружено у блазара В2 1324+22. У остальных переменность менее 50%.

5. 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 вспышки на масштабах времени 110 дней со средней периодичностью около 100 дней. Спектральный индекс $\alpha_{2.3-4.7}$ в течение года изменялся от +0.20 в относительно спокойном состоянии до +0.75 во время вспышек.

Научная новизна

В работе получены радиосвойства большого числа малоизученных источников, в основном, со слабым радиоизлучением в длительных непрерывных обзорах на радиотелескопе РАТАН-600.

Для наиболее ярких источников исследована переменность излучения на масштабах от нескольких месяцев до десяти лет.

Для четверти слабых источников впервые определены спектральные свойства в высокочастотной области спектра ($\nu \geq 4.7$ ГГц).

Впервые обнаружены и исследованы вспышки излучения блазара АО 0235+164 на масштабах ~ 110 дней и периодичностью 100 дней.

Научная и практическая значимость

В работе получены новые измерения большого количества радиоисточников со слабым излучением. Полученная плотность потока источников сопоставима с плотностью потока NVSS каталога и близка к уровню насыщения. Проведено отождествление объектов с объектами, обнаруженными в различных диапазонах длин волн. Для всех источников построены радиоспектры и оценены спектральные свойства, а также исследована переменность их радиоизлучения на масштабах времени от месяцев до 10 лет.

Апробация работы

Конференции:

1. Радиоисточники обзора на склонении пульсара в Крабовидной туманности (Dec = +22°), Конкурс-конференция САО РАН, 2024, устный доклад.
2. Методика обработки обзора неба на склонении Крабовидной туманности на РАТАН-600, Современные инструменты и методы в астрономии, 2023, всероссийская, устный доклад.
3. Свойства источников выборки, наблюдаемых в обзорах неба на РАТАН-600, Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, всероссийская, Москва, 2022, постерный доклад.
4. Обзор неба и исследование радиоисточников обнаруженных на склонении ЗС84 в наблюдениях 2011-2012 гг, Многоликая Вселенная: теория и наблюдения, всероссийская, САО РАН, 2022, постерный доклад.
5. Исследование выборки ярких источников в наблюдениях на западном секторе РАТАН-600, Многоликая Вселенная: теория и наблюдения, всероссийская, САО РАН, 2022, устный доклад.
6. Методика обработки обзоров на РАТАН-600 при неподвижной антенне, Всероссийская астрономическая конференция, Москва, 2021, устный доклад.
7. Источники обзора на склонении GRS 1915+10, Всероссийская астрономическая конференция, Москва, 2021, устный доклад.

Труды конференций

1. Методика обработки обзора неба на склонении Крабовидной туманности Методика обработки обзора неба на склонении Крабовидной туманности на РАТАН-600 /
Н. Н. Бурсов, **А. А. Кудряшова** // Известия Крымской Астрофизической обсерватории, 2024, Том 120, № 2, с. 30-35
2. Study of a Bright Sources Sample in the RATAN-600 Western Sector Observations /
Kudryashova A. A., Bursov N. N., Trushkin S. A. // The Multifaceted Universe: Theory and Observations — 2022 dedicated to the 90th anniversary of Yu. N. Parijski
3. Sources of the survey on the declination of microquasar GRS 1915+105 / Bursov N., Trushkin S.
Kudryashova A., Tsybulev P., Borisov A., Khabibullina M., Kuandykova D. // Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies, Proceedings of the BAK-2021 conference, 2021 , pp.354-355;
4. Method of processing data obtained during RATAN-600 West sector surveys with static antenna /
Kudryashova A. A., Bursov N. N. // Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies, Proceedings of the VAK-2021 conference, 2021, pp.61-62
5. Detected Sources from the Sensitive Survey at the Declination of the Crab Nebula / Bursov, N., Trushkin S., **Kudriashova A.**, Tsybulev P., Nizelskii N., Borisov A. // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Centur, 2020
6. Catalogue of the Radio Sources and a Search for Radio Emission from the Stars at the RATAN-600 / Bursov N. N., **Kudryashova A. A.**, Astronomical Society of the Pacific Conference Series "Stars: From Collapse to Collapse" vol. 510, 2017, p.500

Публикации по теме диссертационного исследования

1. **А. А. Кудряшова** , Н. Н. Бурсов, С. А. Трушкин

Радиоисточники обзора на склонении пульсара в крабовидной туманности
(Dec = +22°), Астрофизический Бюллетень, 2024, том 79, No 1, с. 36–59, DOI:
10.1134/S1990341324700263

2. Yu. Sotnikova, A. Mikhailov, T. Mufakharov, Tao An, D. Kudryavtsev, M. Mingaliev,
R. Udovitskiy, **A. Kudryashova**, V. Stolyarov, T. Semenova,

High-Redshift Quasars at $z \geq 3$: Radio Variability and MPS/GPS Candidates, Galaxies, v. 12, issue 3,
id 25, DOI:10.3390/galaxies12030025

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в проведении наблюдений, оценке параметров антенны и составлении методики обработки данных, а также в разработке программного обеспечения.

Автор проводил работу с литературой и отождествление с оптическими каталогами.

Автор рассчитывал радиосветимость и радиогромкость источников с известным красным смещением.

На долю автора приходится значительная часть работы по обработке, систематизации и анализу данных с привлечением математических методов обработки.

Положения выносимые на защиту:

1. В обзоре за 2018–2019 гг. на радиотелескопе РАТАН-600 на склонении Крабовидной туманности на частоте 4.7 ГГц обнаружено 205 ярких источников ($S_\nu > 15$ мЯн).

Для всех источников определены спектральные плотности потока, за год наблюдений и за каждый из 12 месяцев. Для 26 источников построены ежедневные кривые блеска.

По данным, полученным в работе, а также из базы данных CATS, построены спектры всех объектов выборки. Для четверти источников в высокочастотной области спектра ($\nu \geq 4.7$ ГГц) данные были получены впервые, а для остальных дополнены. С источниками оптических каталогов отождествлено 85% источников выборки.

2. В обзоре на склонении Крабовидной туманности получены оценки индекса переменности для 205 источников на интервалах одного года. У большинства источников переменность плотности потока $< 50\%$. Блазар В2 1324+224 показал увеличение плотности потока в два раза.

3. В ежедневных наблюдениях блазара АО 0235+164 в период 2021-2022 гг. на Западном секторе получены спектральные плотности потоков на частотах 2.3 и 4.7 ГГц со средней ошибкой измерений 5 и 3 %, соответственно. Обнаружены вспышки на масштабах времени 110 дней со средней периодичностью около 100 дней. Спектральный индекс $\alpha_{2.3-4.7}$ в течение года изменялся от +0.20 до +0.75 во время вспышек.

Спасибо за внимание!