

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

*На правах рукописи*  
*УДК 524.7-77:520.27*

Сотникова Юлия Владимировна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОЙ ВЫБОРКИ  
ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ ВБЛИЗИ  
СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА МИРА НА РАТАН-600

Специальность 01.03.02 - астрофизика, радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2009

Работа выполнена в Специальной Астрофизической  
Обсерватории Российской Академии Наук

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук      М.Г. МИНГАЛИЕВ  
(САО РАН)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук      Ю.А. КОВАЛЕВ  
(АКЦ ФИАН)  
г. Москва

кандидат физико-математических наук      В.К. КОННИКОВА  
(ГАИШ МГУ)  
г. Москва

**Ведущая организация:**

Главная Астрономическая Обсерватория РАН (ГАО РАН)  
г. Санкт-Петербург

**Защита состоится** 21 октября 2009 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д002.203.01 в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук по адресу: 396167 САО РАН, пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.  
Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2009 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук      Е.К. МАЙОРОВА

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Внегалактические радиоисточники являются одними из самых больших известных структур во Вселенной. Энергия, сконцентрированная в них в форме релятивистских частиц и магнитного поля, велика и достигает  $10^{60}$  эрг и более. Детальное объяснение процессов, происходящих внутри таких структур, требует разработки конкретных физических моделей, которых на сегодняшний день существует много, но, ни одна из них не обеспечивает полного и успешного описания наблюдаемых проявлений. Радиоизображения с высоким угловым разрешением позволяют увидеть компактную деталь, соответствующую активному ядру галактики (АЯГ), которая, предполагается, является “центральной машиной”. Однако, РСДБ-наблюдения (Радиоинтерферометрия со СверхДлинной Базой) по-прежнему не обеспечивают полного разрешения центральных областей, поскольку разрешающая способность таких систем в лучшем случае ограничена диаметром Земли и не превышают долей угловой миллисекунды на сантиметровых длинах волн. Кроме того, РСДБ-исследованиями охвачено весьма ограниченное число (несколько тысяч) ярких в радиодиапазоне объектов с плотностями потоков от  $0.1 \text{ Ян}^1$  и выше.

Нетепловой спектр излучения компактных активных ядер галактик и его переменность обычно объясняются синхротронным механизмом излучения релятивистских частиц, ускоряемых в окрестностях сверхмассивной черной дыры. Крайне интересным представляется изучение различий между найденными классами объектов, связанных со сверхмассивной черной дырой (радиогалактики, квазары, лацертиды, источники с сильным рентгеновским и гамма излучением).

Комплексные многочастотные исследования структуры и спектров, использующие наблюдения на РСДБ сетях и одиночных антеннах, позволяют сделать конкретные выводы о физике процессов в этих компактных объектах. Становится возможным проводить полноценный статистический анализ характеристик большого количества внегалактических объектов, наблюдаемых на одиночных антеннах и интерферометрах (спектры, компактная и протяженная радиоструктура, переменность и поляризация). Наблюдение переменности излучения потока АЯГ на одиночных антеннах в широком

---

<sup>1</sup>  $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{Гц}$

диапазоне длин волн предоставляет независимую от интерферометрических наблюдений и важную информацию о структуре источников и динамике процессов, происходящих в них. В АЯГ наблюдаются сложные процессы изменения потока излучения. Мы видим изменения плотности потока, происходящие на различных временных шкалах и имеющие различные спектральные характеристики [*Wagner and Witzel, 1995*].

Статистические свойства спектральных индексов радиоисточников являются важным инструментом, как для понимания физики объектов, так и для исследования эволюции разных их классов и взаимосвязи между ними. Информация о спектрах в широком диапазоне длин волн облегчает задачу разделения различных классов объектов и определения их общих свойств. Кроме того, внегалактические источники представляют собой инструмент для космологических исследований. Их статистика и светимости, пространственная плотность позволяют делать оценки, важные для космологической эволюции Вселенной.

При решении вышеуказанных проблем астрофизики радиотелескоп РАТАН-600 [*Парийский, 1993*] до сих пор является уникальным инструментом, обеспечивая возможность получения мгновенного спектра в широком диапазоне частот (1-30 ГГц) за сравнительно короткий промежуток времени (от 1 до 50 минут в зависимости от склонения радиоисточника).

Радиоисточники, находящиеся в области северного полюса Мира, представляют особый интерес для исследований, так как из-за больших склонений доступны для наблюдения большинству наземных радиотелескопов Северного полушария Земли в течение длительного времени. Такие незаходящие источники предоставляют хорошую возможность их наблюдения в течение суток и более, что особенно важно при исследовании переменности космических объектов в области низких потоков, требующих значительных времен накопления сигналов. Исследуемая область содержит в себе внегалактические источники радиоизлучения, так как они находятся за пределами плоскости нашей Галактики (галактическая широта исследуемой области  $|b| > 12^\circ$ ).

С другой стороны, в указанной области небесной сферы не выполнялись обзоры источников неба на разных частотах даже до средних уровней плотности потока. Единственный представительный обзор выполнен на частоте 1.4 ГГц с

использованием системы апертурного синтеза VLA<sup>2</sup> [Condon et al., 1998] (далее NVSS<sup>3</sup>-обзор). В связи с этим, спектральные характеристики радиоисточников в этой области неба слабо изучены. Так, на частоте 5 ГГц значения плотностей потоков имеют менее половины источников исследуемой в настоящей работе выборке. Вблизи частоты 20 ГГц измерения имеют около 10% источников. Данные оценки сделаны с использованием базы данных CATS<sup>4</sup> [Verkhodanov et al., 1997] (на момент марта 2005 г.).

### **Цели и задачи исследования:**

Основная цель работы - многочастотное исследование полной по плотности потока ( $S \geq 200$  мЯн на частоте 1.4 ГГц) выборки внегалактических радиоисточников на шести частотах (1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц) в малоизученной области Северного неба вблизи полюса с использованием радиотелескопа РАТАН-600. Основу работы образуют новые данные наблюдений на РАТАН-600, полученные с участием автора, и их анализ, выполненный также с привлечением результатов, полученных другими авторами на одиночных антеннах и РСДБ сетях. Исследуется спектральное поведение радиоисточников выборки на частотах РАТАН-600. Исследуется переменность радиоизлучения объектов выборки с плоскими спектрами (спектральный индекс  $\alpha \geq -0.5$ , при  $S \sim \nu^{\alpha 5}$ ) на временных масштабах от суток до 8 лет.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Многочастотный каталог полной по плотности потока выборки 504 радиоисточников приполярной области Северного неба.
2. Результаты оптических отождествлений источников полученного каталога.
3. Широкодиапазонные мгновенные радиоспектры исследуемых источников каталога на шести длинах волн: 1.38, 2.7, 3.9, 6.3, 13 и 30 см. Статистические свойства выборки.
4. Результаты исследования переменности источников выборки, имеющих плоские спектры, на временных масштабах от суток до 8 лет.

---

<sup>2</sup> VLA – the Very Large Array

<sup>3</sup> NRAO (National Radio Astronomy Observatory) VLA Sky Survey

<sup>4</sup> Система поддержки астрофизических каталогов [<http://www.sao.ru/cats/>]

<sup>5</sup> Далее везде спектральный индекс рассматривается, исходя из условия  $S \sim \nu^{\alpha}$

## Основные результаты диссертации:

1. Проведен многочастотный обзор источников радиоизлучения в области северного полюса Мира со следующими критериями выборки:

- прямое восхождение  $00^{\text{h}} \leq \text{RA} \leq 24^{\text{h}}$ ;
- склонение  $75^{\circ} \leq \delta \leq 88^{\circ}$  ( $|b| > 12^{\circ}$ );
- плотность потока  $S \geq 200$  мЯн (на частоте NVSS - 1.4 ГГц);
- общее число источников – 504.

Получен многочастотный каталог полной по плотности потока выборки 504 радиоисточников приполярной области неба на длинах волн 1.38, 2.7, 3.9, 6.3, 13 и 30 см. С использованием модулей штатного пакета FADPS (Flexible Astronomical Data Processing System) и расчетной диаграммы направленности Южного сектора РАТАН-600 написан алгоритм обработки измерений, учитывающий особенности наблюдений вблизи полюса с большой временной длительностью.

2. Получены мгновенные широкодиапазонные спектры источников каталога, выполнен их анализ и определены спектральные свойства выборки такой полноты в диапазоне частот 1-21.7 ГГц в приполярной области неба. Доля источников с плоскими (спектральный индекс  $\alpha \geq -0.5$ ) спектрами – 11%, большинство источников имеют нормальные ( $-1.1 < \alpha < -0.5$ ) спектры – 65%, 24% источников выборки имеют крутые спектры ( $\alpha \leq -1.1$ ).

3. С использованием внегалактической базы данных NED (NASA/IPAC) получены оптические отождествления и красные смещения радиоисточников. Большинство из них не отождествлено с оптическими объектами (72.8%). С галактиками отождествлено 110 источников выборки (~ 21.8 %), среднее красное смещение которых равно 0.32; с квазарами отождествлено 27 источников (~ 5.4 %) со средним красным смещением 1.13.

4. Исследована долговременная переменность объектов каталога со спектральным индексом  $\alpha \geq -0.5$  на интервале 8 лет с привлечением наблюдений источников этой области неба в 1999 г. Показано, что в выборке преобладают источники, спектральная плотность потока которых описывается степенным законом и убывает с частотой. Исследования выявили 46% источников с переменностью плотности потока радиоизлучения от 30% и выше (по уровню  $5\sigma$ ) на 3-4 частотах (21.7, 11.2, 7.7 и 4.8 ГГц). Обнаружено, что средний индекс переменности для объектов

растет слабо как с частотой (уровень – 0.3-0.5 в диапазоне частот 4.8-21.7 ГГц), так и со спектральным индексом. На основе анализа многочастотных радиоспектров и долговременной переменности выявлено 4 кандидата в GPS-источники (Gigahertz-Peaked Spectrum): J0626+82, J0726+79, J1823+79 и J1935+81.

5. Исследована быстрая переменность источников каталога (на масштабах от суток до месяца). Обнаружено 15 источников (из 33 исследовавшихся источников с плоским спектром), показавших переменность на масштабах порядка суток и более (в системе отсчета наблюдателя) на длинах волн 1.38, 2.7, 3.9 и 6.3 см. Амплитуда переменности не превышает 10%, что согласуется с предыдущими результатами на таких масштабах для внегалактических радиоисточников. Для большинства источников амплитуда переменности растет с ростом частоты. Из 15 исследовавшихся источников 11 были обнаружены нами впервые как быстропеременные в радиодиапазоне одновременно на трех-четырех частотах. По результатам статистического анализа быструю переменность показали как объекты с долговременной переменностью (изменение плотности потока - от 30% и выше по уровню  $5\sigma$ ), так и объекты со стационарным радиоспектром. Для малоизученного ранее объекта типа VL Lacertae J2022+76 переменность радиоизлучения на этих масштабах на частотах 11.2, 7.7 и 4.8 ГГц обнаружена впервые. Показано, что она коррелирует на этих частотах. Амплитуда переменности источника уменьшается с ростом частоты. Изменение величины амплитуды переменности (уменьшение с ростом частоты) вместе с наличием корреляции изменений потока на разных частотах может указывать на внешние причины переменности. С привлечением данных в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также более ранних радиоизмерений, выполнен анализ быстрой переменности объекта типа VL Lacertae J2005+77. Сравнительный анализ быстрой переменности источника, полученной на РАТАН-600 в 2007 г. и переменности, полученной на VLA и Effelsberg в 1997 г. показал одинаковый ход амплитуды переменности с частотой, а именно - рост. При этом в 2007 г. величина амплитуды переменности уменьшилась в несколько раз: она не превышала 3% на частотах 4.8, 7.7 и 11.2 ГГц, тогда как в 1997 г. она достигала 6-9% в этом диапазоне. Источник является типичным представителем АЯГ, в котором развитие вспышечной активности происходит с временной задержкой от оптического к радио диапазону.

**Новизна и научная значимость.** *Многочастотный каталог и мгновенные широкодиапазонные спектры 504-х источников каталога* получены впервые для полной выборки такой полноты в указанной области неба. Исследование быстрой и долговременной переменности для источников выборки с плоскими спектрами выполнено так же впервые. Результаты спектрального анализа настоящего обзора радиоисточников являются новыми и достоверными, так как измерения и обработка производились апробированными ранее методами, на всех частотах практически одновременно с использованием одного инструмента, что позволило уменьшить влияние систематических ошибок и переменности радиоисточников на результаты обзора.

**Научная и практическая ценность работы.** Настоящий обзор радиоисточников является многочастотным и полным. Поэтому полученные результаты являются характерными и для любой другой выборки источников с такой же полнотой. Полученные результаты наблюдений и анализа спектральных свойств источников могут быть использованы в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях. Полнота и статистическая значимость выборки позволяют исследовать природу объектов и механизмы их переменного и постоянного радиоизлучения. Полученные многочастотные широкодиапазонные мгновенные радиоспектры позволяют проследивать динамику вспышки и использовать результаты для интерпретации переменности радиоизлучения в рамках существующих или будущих моделей.

Проведение данного обзора было инициировано необходимостью отбора перспективных компактных радиоисточников для научной программы наземно-космического интерферометра проекта “Радиоастрон” [<http://www.asc.rssi.ru/RadioAstron/index.html>]. Результаты могут использоваться в работах с этим интерферометром для получения изображений, координат и угловых перемещений различных объектов Вселенной с исключительно высоким разрешением.

Большинство источников приполярного обзора являются мало изученными в широком диапазоне частот. Экспериментальная информация по долговременной и кратковременной переменности подобных радиоисточников является важной для пополнения списка уже известных переменных объектов, а также для будущих исследований



миссии Планка [*Planck*, 2005] на высоких частотах, где такого рода источники могут быть непредсказуемо яркими.

Созданный алгоритм обработки может использоваться и в дальнейшем при наблюдениях источников в приполярной области неба.

**Личный вклад автора диссертации.** Все результаты диссертации опубликованы в 11 работах, перечисленных в Списке публикаций [1-11], и получены в соавторстве. Личный вклад состоит в следующем.

1. Участие в проведении и обработке наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600, в подготовке программного обеспечения [1-11].
2. Участие в анализе спектральных свойств выборки радиоисточников, в сравнительном статистическом анализе данных, полученных с помощью РАТАН-600 и другими авторами [1, 4]; в сравнительном анализе переменности радиоизлучения объектов типа VL Lacertae J2022+76 и J2005+77 [3, 9]; в многочастотных спектральных исследованиях выборки Gigahertz-Peaked Spectrum источников и кандидатов с помощью РАТАН-600, отборе “истинных” GPS-источников и сравнительном анализе данных РАТАН-600 и РСДБ измерений VLBI<sup>6</sup> [5, 6, 7, 10].
3. Отождествления источников каталога с оптическими источниками с использованием базы данных NED [1].
4. Статистический анализ данных по долговременной и быстрой переменности [2, 3, 8, 11].

Кроме того, во всех работах [1-11] автор участвовал в обсуждении полученных результатов.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключение, трех Приложений и Списка цитируемой литературы. Содержит 44 рисунка на 65 страницах, 21 таблиц на 20 страницах. Общий объем составляет 182 страницы, включая рисунки, таблицы и библиографию из 123 наименований на 6 страницах. Представленная диссертация является результатом работ, выполненных и опубликованных в течение 2005-2009 гг.

**Апробация результатов.** Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в работах [1-11], перечисленных в Списке публикаций по теме диссертации, и обсуждались автором

---

<sup>6</sup> Very Long Baseline Interferometry

на семинарах САО РАН, АКЦ ФИАН, двух Всероссийских и восьми Международных конференциях.

1. Международная конференция “The XXXV Young European Radio Astronomer’s Conference”, Кальяри, Италия (2005).

2. XXIII Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино-на-Оке, ПРАО АКЦ ФИАН (2006).

3. Международная конференция “The XXXVI Young European Radio Astronomer's Conference”, Conference Center de Bron, Голландия (2006).

4. IX Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy “Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei”, Нижний Архыз, САО РАН (2006).

5. Международная конференция “Cosmic Physics”, Нижний Архыз, САО РАН (2007).

6. Всероссийская астрономическая Конференция, Казань, КГУ (2007).

7. Международная конференция “Сахаровские осцилляции и радиоастрономия”, Нижний Архыз, САО РАН (2007).

8. 37-я Международная студенческая конференция “Физика космоса”, Коуровка (2008).

9. X Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy “Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei”, Orilampi, Finland (2008).

10. Международная конференция “The Radio Universe at Ultimate Angular Resolution”, Москва, АКЦ ФИАН, (2008).

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и сформулирована цель работы. Отмечены новизна основных результатов и их апробация. Показана их научная и практическая значимость и личный вклад автора в проведенные исследования.

**Глава 1 “Каталоги радиоисточников. Наблюдения дискретных радиоисточников на РАТАН-600 (обзор литературы)”** посвящена исследованиям дискретных источников различных классов и краткому сравнительному анализу основных обзоров неба. основополагающие обзоры, охватывающие значительные участки небесной сферы, выполнены на частотах 5 ГГц и ниже [*Condon et al., 1998, Gregory et al., 1996, Амирханян и др., 1998*]. К настоящему времени известно около двух миллионов галактических и внегалактических радиоисточников самой разнообразной природы и свойств. Но пока не существует полных обзоров неба в диапазоне частот от 5 ГГц до 3 ТГц (6 см – 100 мкм). Это представляет пробел в наших представлениях о спектральных свойствах внегалактических объектов на высоких частотах. Как известно, [*Taylor et al., 2001*], популяции радиоисточников не могут быть надежно предсказаны путем экстраполяции спектра с низких частот на высокие.

Суммируя исследования радиоисточников во всех диапазонах можно сделать выводы. По мере роста частоты наблюдений доля объектов с компактными компонентами растет. отождествляемая с ними доля квазаров также увеличивается. Этот эффект связан с уменьшением относительной доли менее мощных, чем квазары, радиогалактик, имеющих нормальные спектры. Компактные активные ядра галактик обнаруживают явно выраженный феномен переменности потока излучения, связанный, как полагают, с деятельностью черной дыры в их центральных областях. Индекс переменности потока излучения компактных радиоисточников при продвижении с сантиметрового диапазона в сторону миллиметровых волн изменяется не более, чем в полтора раза [*Sadler et al., 2006*]. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн наблюдается и очень быстрая переменность плотности потока излучения, на масштабах дней и часов (IDV – Intraday Variability) [*Wagner and Witzel, 1995*]. В настоящее время существует не очень много наблюдательных данных о связи IDV-переменности в различных частотных диапазонах.

В главе обосновывается необходимость проведения обзора радиоисточников в приполярной области северного неба. Из-за больших склонений такие источники доступны для наблюдения большинству наземных радиотелескопов Северного полушария Земли в течение длительного времени и предоставляют хорошую возможность их наблюдения в течение суток и более. Как известно, для исследования переменности плотности потока требуются значительные времена накопления сигналов. Исследуемая область содержит в себе внегалактические источники, так как они находятся за пределами плоскости нашей Галактики (галактическая широта исследуемой области  $|b| > 12^\circ$ ). Ранее в указанной области небесной сферы не выполнялись обзоры источников неба на разных частотах даже до средних уровней плотности потока. Единственный представительный обзор выполнен на частоте 1.4 ГГц с использованием системы апертурного синтеза VLA [Condon et al., 1998]. В связи с этим, спектральные характеристики радиоисточников в этой области неба слабо изучены.

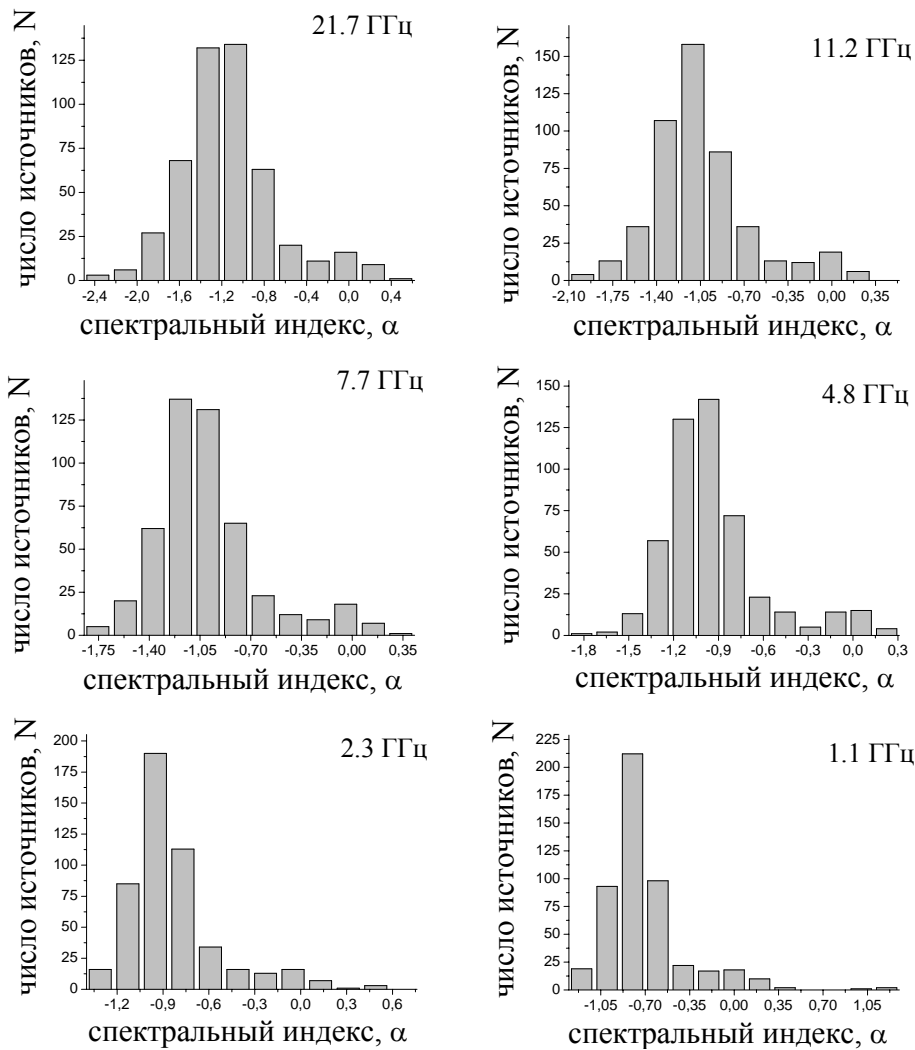
**Глава 2 “Методика наблюдений и обработки. Результаты”** посвящена описанию особенностей наблюдений на РАТАН-600, в частности - особенностям наблюдений приполярной области Северного неба. Указанная область неба ( $75^\circ \leq \delta \leq 88^\circ$ ) представляет ряд трудностей и для наблюдений, и для обработки. Во-первых, это большая временная длительность каждого наблюдения. Во-вторых, при больших временных масштабах источника может значительно меняться фон из-за нестабильности атмосферы [Есенкина и др., 1973], что усложняет обработку данных. Для обработки наблюдательного материала использовались модули штатного пакета FADPS (Flexible Astronomical Data Processing System) [Verkhodanov, 1997] в среде Linux, представляющей систему обработки для данных широкополосных радиометров континуума вторичного зеркала №1 (Облучатель №1) РАТАН-600. Для приполярной области были рассчитаны переменные параметры обработки: размер окна вычитания составляющих фона, порог вписывания гауссианы, выделяемый интервал записи и др. Для улучшения отношения сигнал/шум использовалась свертка с расчетной диаграммой направленности антенны, которая рассчитывалась при помощи программы *bp1* [Коржавин, 1979]. Приводится алгоритм использованной обработки и калибровки измерений по плотности потока, а также полученный многочастотный каталог исследуемых 504 радиоисточников. На частоте 21.7 ГГц значения

плотностей потоков получены для 28.6% объектов выборки и для большинства из них на других частотах (Таблица 1).

**Таблица 1.** Доля радиоисточников выборки, для которых получены значения плотности потока на исследованных частотах

21.7 ГГц	11.2 ГГц	7.7 ГГц	4.8 ГГц	2.3 ГГц	1.1 ГГц
28.6%	98.8%	99.0%	100%	97.0%	92.9%

**Глава 3 “Анализ спектральных, статистических свойств и оптических отождествлений источников выборки”** посвящена спектральному анализу источников выборки, зависимости среднего спектрального индекса от частоты, результатам оптических отождествлений радиоисточников исследуемой выборки, зависимости доли различных классов объектов с ростом плотности потока. Определено распределение источников по типам спектров. Большинство источников выборки имеют нормальные спектры - 65% (спектральный индекс  $-1.1 < \alpha < -0.5$ ); источники с плоским спектром составляют незначительную долю выборки - 11% ( $\alpha \geq -0.5$ ), 24% источников выборки имеют крутые спектры ( $\alpha \leq -1.1$ ). На рисунке 1 представлены гистограммы распределения источников каталога по спектральным индексам в диапазоне частот 1.1-21.7 ГГц. Рост среднего спектрального индекса с уменьшением частоты может объясняться уплощением спектров за счет самопоглощения на низких частотах. В свою очередь, увеличение среднего спектрального индекса с увеличением частоты может компенсироваться возрастающей долей объектов с изломами спектров в коротковолновом участке сантиметрового диапазона длин волн.



**Рисунок 1.** - Гистограммы распределения источников каталога по спектральным индексам в диапазоне частот 1.1-21.7 ГГц.

Оптические отождествления и красные смещения объектов получены с использованием внегалактической базы данных NED<sup>7</sup> [<http://nedwww.ipac.caltech.edu/index.htm>]. Большинство объектов выборки не отождествлено с оптическими объектами (72.8%). С галактиками со средним красным смещением 0.32 отождествлены 110 (~ 21.8%) объектов выборки; 27 (~5.4%) объектов выборки отождествлены с квазарами со средним красным смещением 1.13.

В Главе сделано сравнение спектральных свойств выборки на частоте 4.8 ГГц, полученных в настоящем обзоре и полученных из скомпилированных каталогов радиоисточников других авторов в этой области. Для этого использовалась база данных CATS. Анализ каталогов других авторов дает 20% источников выборки со спектральными индексами  $\alpha \geq -0.5$ , что в 2 раза больше, чем получено в результате настоящего обзора. Доля источников с крутыми спектрами в проведенном обзоре составляет 24%, тогда как оценки дают 10.8%. Скорее всего, такое расхождение дают источники выборки, не имеющие

<sup>7</sup> NED - NASA/IPAC Extragalactic Database

измерений на высоких частотах. В основном это источники с крутыми и нормальными спектрами. Для большинства из них измерения ограничены сверху частотой 1.4 ГГц. Так как оценки получены методом экстраполяции низкочастотных измерений, то за счет самопоглощения излучения мы в результате получаем плоский спектр.

Сравнительный анализ полученных результатов с результатами, полученными в работах других авторов по спектральному исследованию выборок радиисточников, выявил, что при исследовании источников в этой же области неба, но с плотностями потоков от 400 мЯн на 1.4 ГГц, доля источников с плоскими спектрами составляет 15.5% [Mingaliev et al., 2001]. При исследовании выборки источников подобной по площади области Южного неба ( $S \geq 100$  мЯн на частоте 20 ГГц) доля источников с плоскими спектрами составляет уже 69% [Sadler et al., 2006]. При этом с увеличением доли источников с плоскими спектрами увеличивается доля квазаров и уменьшается доля галактик и неотожествленных в оптике источников. Сравнение с радиосpekтрами объектов RZF<sup>8</sup>-каталога [Семенова и др., 2007], на порядок более глубокого ( $S \geq 2.5$  мЯн на 3.9 ГГц), чем NVSS-каталога показывает увеличение доли источников с плоскими спектрами – 39.6%, что в работе объясняется изменением относительной роли различных популяций объектов (падение роли объектов типа FR II<sup>9</sup>).

**Глава 4. “Переменность радиоизлучения источников с плоскими спектрами”** посвящена исследованию долговременной и быстрой (от суток до 30 дней) переменности радиисточников с плоскими спектрами. Долговременная переменность оценивается на интервале до 8 лет (с привлечением данных наблюдений по другим наблюдательным программам РАТАН-600). Используются результаты наблюдений в 1999 г. [Mingaliev et al., 2001] данной выборки, но ограниченной по плотности потока снизу 400 мЯн на частоте 1.4 ГГц, куда попали практически все объекты нашей выборки, имеющие плоские спектры. Также используются результаты наблюдений отдельных источников, полученные нами в 2006, 2007 и 2008 году. В августе 2007 г. в течение 30 дней на РАТАН-600 наблюдались 33 радиисточника исследуемой выборки с плоскими радиосpekтрами [Мингалиев и др., 2009] для обнаружения

---

<sup>8</sup> RATAN-600 Zenith Field

<sup>9</sup> Класс радиогалактик Fanaroff-Riley II

переменности радиоизлучения на масштабах суток и более. Для статистического анализа быстрой переменности использовалась методика, описанная в работе [Quirrenbash et al., 2000]. Первоначально находился модуляционный индекс исследуемого и опорного источника. Модуляционный индекс источника определялся по формуле  $m[\%]=100 \cdot \frac{\sigma_1}{\langle Ta \rangle}$  (где  $Ta$  – средняя антенная температура за цикл наблюдений,  $\sigma_1$  – ее среднеквадратичная ошибка). Далее по критерию  $\chi^2$  (уровень достоверности 0.1%) определялось, является ли источник переменным, и в случае положительного результата определялась амплитуда переменности исследуемого источника  $Y[\%]=3\sqrt{m^2 - m_0^2}$  (где  $m$  и  $m_0$  – модуляционный индекс исследуемого и опорного источника соответственно). В настоящей работе методика, описанная в работе [Quirrenbash et al., 2000], была адаптирована к условиям наблюдений на антенне переменного профиля. Диаграмма направленности отдельного сектора РАТАН-600 имеет ножевую форму и меняется по ширине с высотой источника над горизонтом [Парийский и Шиврис, 1972]. При наблюдениях приполярной области эта зависимость выражена сильнее, чем при наблюдениях на средних широтах. Большая временная длительность прохождения источника через диаграмму направленности (например, 55 минут для склонения  $\delta=88^\circ$ ) является причиной большей дисперсии остаточного шума из-за нестабильности фона. Поэтому, в нашем случае для количественной оценки переменности мы используем модуляционным индексом как функцией склонения источника. Для этого было выбрано три опорных источника 0016+79, 0410+76 и 2344+82, по высоте покрывающих практически всю зону исследования. Для них были посчитаны модуляционные индексы на длинах волн 1.38, 2.7, 3.9 и 6.3 см. Далее, путем аппроксимации вычислена зависимость модуляционного индекса от склонения источника в диапазоне склонений  $75^\circ - 82^\circ$ . Для опорных источников модуляционный индекс фактически отражает уровень аппаратурных (антенна, приемники) и атмосферных нестабильностей и составляет величину 0.5-3% на 1.4 см и доли процента на 2.7, 3.9 и 6.3 см.

В результате статистического анализа было обнаружено 15 источников, показавших наличие суточной переменности (в системе отсчета наблюдателя) на длинах волн 1.38, 2.7, 3.9 и 6.3 см. Большинство из них – квазары. Амплитуда переменности



таких источников не превышает 10%, что согласуется с типичными результатами по исследованию компактных внегалактических радиоисточников [Heeschen et al., 1987; Quirrenbash et al., 2000; Kedziora-Chudczer et al., 2001; Kraus et al., 2003]. Обнаруженная быстрая переменность источников J0626+8202, J1153+8058, J1800+7828 и J2005+7752 подтвердила результаты работ других авторов [Heeschen et al., 1987; Quirrenbash et al., 2000; Kraus et al., 2003]. В радиодиапазоне обнаружена быстрая переменность источника J1632+82 (NGC 6251), который ранее был известен как быстропеременный в рентгеновском диапазоне (2.2-2.8% в полосе 0.4-10 keV) [Gliozzi et al., 2004].

Таким образом, 11 из 15 источников были обнаружены нами впервые как быстропеременные в радиодиапазоне одновременно на трех-четырех частотах (21.7, 11.2, 7.7 и 4.8 ГГц). По результатам статистического анализа быструю переменность показали как объекты с долговременной переменностью (изменение плотности потока - от 30% и выше по уровню  $5\sigma$ ), так и объекты со стационарным радиоспектром.

Анализируется природа быстрой переменности источника типа VL Lacertae J2022+76, в котором переменность радиоизлучения на масштабах суток была обнаружена на трех частотах 11.2, 7.7 и 4.8 ГГц. Ранее источник не исследовался на быструю переменность, поэтому такая переменность для J2022+76 обнаружена нами впервые. Объект относится к классу VL Lacertae и имеет мало измерений в радио и оптическом диапазонах. Красное смещение источника не определено точно, в работе [Stickel and Kuerh, 1996] дается его нижний предел  $z \geq 0.2$ . Отмечена корреляция изменений плотности потока излучения на разных частотах радиодиапазона. Амплитуда переменности источника уменьшается с ростом частоты. Изменение величины амплитуды переменности указывает на внешний характер переменности, а наличие корреляции изменений потока на разных частотах может указывать на внутренние причины. Отсутствие измеренного красного смещения и экспериментальной информации в других диапазонах длин волн не позволяет провести достаточно надежную интерпретацию полученных наблюдательных данных.

Рассматривается переменность источника типа VL Lacertae J2005+77 с привлечением данных в оптическом и инфракрасном диапазоне. Источник ранее обнаруживал вариации плотности потока радиоизлучения (0.85-13.9% в сантиметровом диапазоне)

на масштабах порядка суток [*Krichbaum et al., 2000, Peng et al. 2000*]. Сравнительный анализ быстрой переменности источника, полученной на РАТАН-600 в 2007 г. и переменности, полученной на VLA и Effelsberg в 1997 г. [*Peng et al., 2000*] показал одинаковый ход амплитуды переменности с частотой (рост). При этом в 2007 г. величина амплитуды переменности уменьшилась в несколько раз: она не превышала 3% на частотах 4.8, 7.7 и 11.2 ГГц, тогда как в 1997 г. она достигала 6-9% в этом диапазоне. Источник является типичным представителем АЯГ, в котором развитие вспышечной активности происходит с временной задержкой от оптического к радио диапазону.

**В Заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В Приложении 1** представлен *каталог 504 радиоисточников* приполярной выборки на частотах 1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц, полученный на РАТАН-600 в 2005 г.

**В Приложение 2** приводятся *широкодиапазонные мгновенные спектры радиоисточников* приполярной выборки, полученные на РАТАН-600 в 2005 г.

**В Приложение 3** приводятся *многочастотные радиоспектры* объектов приполярной выборки со спектральным индексом  $\alpha \geq -0.5$ , полученные на РАТАН-600 в период 1999-2007 гг.

Работа проводилась с использованием системы поддержки астрофизических каталогов CATS (<http://cats.sao.ru/>) CAO РАН [*Verkhodanov et al., 1997*], а также внегалактической базы данных NASA/IPAC (NED) <http://nedwww.ipac.caltech.edu/index.html>, сопровождение которой осуществляет Лаборатория реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory) Калифорнийского технологического института в рамках соглашения с NASA.

Обработка наблюдательного материала и континуальных радиоспектров производилась с использованием модулей штатного пакета FADPS (Flexible Astronomical Data Processing System) [*Verkhodanov, 1997*] в среде Linux, представляющей систему обработки для данных широкополосных радиометров континуума вторичного зеркала (Облучателя №1) РАТАН-600.

## Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации суммированы в следующих работах:

*а) статьи в рецензируемых научных журналах:*

1. Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Бурсов Н.Н., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. “Спектральные характеристики радиоисточников вблизи северного полюса Мира”, *Астрономический журнал*, **84**, №5, с. 343-363 (2007).
2. Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. “Исследование спектральных характеристик и переменности радиоисточников вблизи северного полюса Мира”, *Астрономический журнал*, **86**, №6, с. 531-545 (2009).
3. Сотникова Ю.В., Ларионов М.Г., Мингалиев М.Г. “Наблюдение быстрой переменности двух объектов типа VL Lacertae J2005+77 и J2022+76 на РАТАН-600”, *Астрофизический бюллетень САО*, **64**, №2, с. 190-195 (2009).

*б) публикации в материалах Всероссийских и Международных конференций, симпозиумов:*

4. M.G Mingaliev, M.G Larionov, J.V. Sotnikova, N.N. Bursov, N.S. Kardashev. “Radio spectra properties of a complete sample of sources near the North Celestial Pole”, in IX Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei, Abstracts, Nizhnij Arkhyz, SAO RAS, October 15-20, p. 27, 2006.
5. M. G. Mingaliev, Sotnikova Y.V. “Investigation of radio spectra and long term variability of GHz-Peaked-Spectrum radio sources and candidates at RATAN-600” 2007, Тезисы докладов международной конференции “Cosmic Physics”, Nizhnij Arkhyz, SAO RAS, May 27-31, p. 27-31, 2007.
6. Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Tornainen I., Tornikoski M., Valtaoja E., “Исследование мгновенных спектров и долговременной переменности GPS (gigahertz-peaked spectrum) источников на РАТАН-600”, Тезисы докладов Всероссийской астрономической Конференция, Казань, КГУ, 17-21 сентября, с. 411, 2007.
7. Парийский Ю.Н., Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Lähteenmäki A., Tornainen I., Tornikoski M., Valtaoja E.,

- “СМВ-эксперименты и проблемы фоновых радиоисточников”, Тезисы докладов международной конференции “Сахаровские осцилляции и радиоастрономия”, Нижний Архыз, САО РАН, 15-19 октября, с. 12, 2007.
8. Sotnikova Yu.V., Erkenov A.K., “Variability study of flat-spectrum radio sources sample at the RATAN-600”, in X Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy “Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei”, Abstracts, Orilampi, Finland, September 1-5, p. 19, 2008.
  9. Sotnikova Yu.V., Erkenov A.K., “Variability of two BL Lacertae objects: J2005+77 and J2022+76”, in X Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy “Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei”, Abstracts, Orilampi, Finland, September 1-5, p. 24, 2008.
  10. Mingaliev M.G., Sotnikova Yu.V., Erkenov A.K., “Long-term variability monitoring of BL Lac and GPS sources at the RATAN-600: the preliminary results”, in X Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy “Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei”, Abstracts, Orilampi, Finland, September 1-5, p. 25, 2008.
  11. Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Ларионов М.Г., Кардашев Н.С., “Spectral Properties and Variability of Radio Sources near the North Celestial Pole”, Тезисы докладов международной конференции “The Radio Universe at Ultimate Angular Resolution”, Москва, АКЦ ФИАН, 20-24 октября, 2008.

## Список цитируемой литературы

- Condon J.J., Cotton W.D., Greisen E.W. and Q.F. Yin, AJ, **115**, 1693 (1998).
- Douglas J.N., Bash F.N., Bozyan G.W., et al., AJ, **111**, 1945 (1996).
- Gliozzi M., Sambruna R.M., Brandt W.N. et al., A&A., **413**, 139 (2004).
- Gregory P.C., Scott W.K., Douglas K., et al. 1996, ApJS, **103**, 427 (1996).
- Heeschen D.S., Krichbaum Th., Schakinski C.J. and Witzel A., AJ, **94**, 1493 (1987).
- Kedziora-Chudczer L.L., Jauncey D.L., et al., MNRAS, **325**, 1411 (2001).
- Kraus A., Krichbaum T.P., et al. A&A, **401**, 161 (2003).
- Krichbaum T. P., Jin C., Kraus A., et al., Zensus, Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, 133 (2000).
- Mingaliev M.G, Stolyrov V.A., Davies R.D., et al., A&A, **370**, 78 (2001).
- O'Dea Ch., PASP, **110**, 493 (1998).
- Peng B., Kraus A., Krichbaum T. P., et al., A&A, **353**, 937 (2000).
- Quirrenbash A., Kraus A., Witzel A., et al., A&AS, **141**, 221 (2000).
- Sadler E.M., Ricci R., Ekers R.D., et al., MNRAS, **372**, 898 (2006).
- Stickel M. and Kuerh H., A&AS, **115**, 11 (1996).
- Taylor A.C., Grainge K., Jones M.E., et al., MNRAS, **327**, L1-L4 (2001).
- Verkhodanov O.V., ASP Conference Series., **125**, 46 (1997).
- Verkhodanov O.V., Trushkin S.A., Andernach H., and Chernenkov V.N., ASP Conf. Ser. **125**, 322 (1997).
- Wagner S.J. and Witzel A., ARA&A, **33**, 163-197 (1995a).
- Wagner S.J., Camenzind M., Dreissigacker O., et al., A&A, **298**, 688-698 (1995b).
- Амирханян В.Р., Горшков А.Г., Капусткин и др., АЖ, **115**, 1693 (1998).
- Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.  
Радиотелескопы и радиометры, М.: Наука, 1973, с. 370.
- Коржавин А.Н., Астрофизические исследования (Изв. САО), **11**, 170 (1979).
- Мингалиев М. Г., Сотникова Ю. В., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г., АЖ, **86**, 531 (2009).
- Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Бурсов Н.Н., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г., АЖ, **84**, 343 (2007).
- Парийский Ю.Н. IEEE Antennas and Propagation Magazine, **35**, 7 (1993).

Парийский Ю.Н., Шиврис О.Р., Изв. главн. астрон. обсерв. в Пулкове, №188, 13-39 (1972).

Семенова Т.А., Бурсов Н.Н., Парийский Ю.Н., АЖ, **84**, 291 (2007).

Сотникова Ю. В., Ларионов М. Г., Мингалиев М. Г., Астроф. Бюллетень САО, **64**, 190 (2009).

Бесплатно

Сотникова Юлия Владимировна  
Исследование полной выборки внегалактических  
радиоисточников вблизи северного полюса Мира  
на РАТАН-600

Отпечатано в типографии  
Специальной астрофизической обсерватории РАН  
369167 пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика,  
Россия  
Заказ № . Уч.-изд. Тираж 100 экз.