

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ФГБУН «КрАО РАН»

А.Н. Ростопчина-Шаховская  
«31» августа 2022 г.

## ОТЗЫВ

Ведущей организации федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук» (КрАО РАН)  
на диссертацию Попкова Александра Викторовича  
«Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений полных выборок», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Диссертация А.В. Попкова посвящена ряду актуальных вопросов современной астрофизики релятивистских выбросов активных галактических ядер (АГЯ). В частности, в работе, исследованы свойства выборки внегалактических источников Северной полярной шапки, широкополосный спектр нейтринно-ассоциированного блазара TXS 0506+056 и его эволюция, а также Доплер-факторы джетов сотен активных галактик, используя наблюдения в режиме радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) и одиночной антенны.

Работа хорошо структурирована, текст диссертации изложен ясно, четко и при этом достаточно подробно, как по части анализа, так и в отношении деталей наблюдений, их планирования и обработки. Приведен необходимый иллюстративный и табличный материал, а основные результаты подробно обоснованы. Все основные результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми и значимыми.

**Содержание работы.** Во Введении приводится описание объекта исследования, современное состояние данной проблематики, основные методы наблюдений, формулируются цели работы, обосновывается новизна и актуальность основных результатов, их практическая значимость и достоверность, приводится список публикаций и обсуждается личный вклад автора в каждую из них.

Первая Глава посвящена детальному исследованию полной выборки 502 источников Северной полярной шапки со склонением выше  $75^\circ$ , отобранных по интегральной плотности потока, превышающей 200 мЯн на 1.4 ГГц. По результатам одновременных 3-суточных РСДБ наблюдений в режиме 'snapshot' (один скан на объект) на частотах 2.3 и 8.6 ГГц обнаружены 17 составных объектов. Важно отметить, что первичная пост-корреляционная калибровка данных была выполнена как в традиционном пакете программ AIPS, так и в относительно новом программном комплексе PIMA, позволяющим проводить более детальный поиск интерференционного отклика апертурной системы и оценивать вероятность ложного детектирования лепестка в отличие от AIPS, где такие возможности не реализованы. Построены РСДБ карты для 94 и 62 источников на 2.5 и 8.6 ГГц, соответственно. Проведен анализ плотностей потоков источников, полученных как с помощью наблюдений в режиме РСДБ (апертурная система VLBA), так и одиночной антенны (РАТАН-600). Проведена классификация полученных широкополосных радиоспектров, изучена связь разных типов спектра с морфологией объектов, а также исследованы корреляции между спектральным индексом и такими параметрами как яркостная температура, угловой размер, компактность и индекс переменности. При обработке данных наблюдений и их анализе использовались адекватные ограничения на ряд параметров: детектирование источника, оценка его угловых размеров и др., что крайне важно при работе со слабыми источниками во избежание искажения физических выводов исследования.

Глава 2 сфокусирована на одном из самых актуальных вопросов современной астрофизики – поиску источников происхождения нейтрино высоких энергий. Первым объектом, отождествленным с нейтринным событием 22 сентября 2017г по данным обсерватории IceCube, был блазар TXS 0506+056. Исследованию широкополосного радиоспектра этого объекта на 4-6 частотах в диапазоне от 1 до 22 ГГц, измеряемому с 1997 по 2018 гг на РАТАН-600, а также его сравнению со спектрами других источников выборки, состоящей примерно из 700 активных ядер галактик, посвящена данная Глава. Плотный многолетний мониторинг большой выборки объектов на РАТАН-600 предоставил уникальную возможность анализа мгновенного спектра объекта TXS 0506+056 как до и после, так и во время самого нейтринного события 22 сентября 2017 г., во время которого произошло изменение формы спектра, что, в свою очередь, является довольно распространенным явлением для компактных джетов активных ядер галактик наблюдаемой выборки. Таким образом, исследуемый объект не является уникальным с точки зрения его спектральных характеристик в радиодиапазоне. Это важный вывод, указывающий на то, что и другие АГЯ могут быть источниками нейтрино, статистика по которым неуклонно растет в последние годы. Многочастотная кривая блеска 0506+056 на 1-22 ГГц показала, что первые нейтринные события в 2013-2014 гг в 0506+056 пришлось на начало вспышки в радиодиапазоне, а высокоэнергичное нейтринное событие 2017 г. – на развитие самой мощной вспышки за всю историю наблюдений этого блазара.

В Главе 3 представлены результаты измерения яркостных температур ядер более чем 400 активных галактик по данным мониторинговой программы MOJAVE и оценки Доплер-фактора для 309 выбросов с учетом результатов измерения их видимых скоростей на основе РСДБ наблюдений как для всей выборки, так и для статистически полной по потоку выборки источников на частоте 15 ГГц, состоящей из 206 объектов. Проведен также анализ на наличие систематических сдвигов в оценках Доплер-фактора,

получаемых разными методами. Сделан вывод о том, что джеты активных ядер галактик на парсековых масштабах, находящиеся в спокойном (невспышечном) состоянии, близки к равномерному распределению энергии между магнитным полем и излучающими частицами.

### **Практическая значимость.**

1. Соискатель разработал программу автоматического составления оптимизированных расписаний сеансов наблюдений на Северном секторе радиотелескопа РАТАН-600 с целью минимизации времени на переустановку антенны. Это важно, т.к. наблюдения на данном секторе РАТАН-600 идут практически в непрерывном режиме.

2. Для процедуры гибридного картографирования проведен анализ интенсивности в фазовом центре синтезируемого изображения в зависимости от временного от интервала усреднения данных при фазовой самокалибровке функции видности. Сделан вывод, что при восстановлении распределения яркости слабых или сильно разрешенных источников нужно проводить анализ устойчивости процедуры самокалибровки фаз, чтобы избежать генерации ложного сигнала из шума при малых интервалах времени усреднения.

3. На основе полученных Доплер-факторов джетов 309 источников и их видимых скоростей, получены оценки соответствующих углов к лучу зрения. Эти результаты могут и будут использованы в других исследованиях активных ядер галактик.

**Замечания.** В работе встречаются как грамматические, так и синтаксические ошибки, но число их невелико. Есть два замечания.

1. В подрисуночной подписи Рис. 1.2, а также на вертикальной оси соответствующих примеров указано, что приведена «интенсивность в центральном пикселе карты». По-видимому, имеется в виду фазовый центр изображения.

2. В формуле (1.4) для оценки верхнего предела на угловой размер главной структурной детали изображения неясно как рассчитывался параметр «сигнал/шум карты в области, занятой главной компонентой», если модельный размер последней очень мал. По-видимому, использовалась область **большая**, чем занимаемая главной компонентой. **Насколько большая?**

**Автореферат** диссертации в полной мере отражает содержание работы. По теме диссертационного исследования автором опубликовано три научные работы в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

**Диссертация Попкова Александра Викторовича «Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений полных выборок» представляет собой цельную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне, которая отвечает всем требованиям ВАК при Минобрнауки России, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».**

Отзыв обсужден и одобрен на объединенном астрофизическом семинаре ФГБУН «КрАО РАН». Протокол от 13.07.2022 года.

Заместитель директора ФГБУН «КрАО РАН», доктор физико-математических наук

А.Е. Вольвач

Подпись А.Е. Вольвача заверяю. Начальник отдела кадров ФГБУН «КрАО РАН»

А.С. Семенова

**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (ФГБУН «КрАО РАН»)

**E-mail:** [crao@inbox.ru](mailto:crao@inbox.ru)

**Телефон:** + 7 (365554) 71161

**Почтовый адрес:** 298409, Республика Крым, Бахчисарайский р-н, пгт. Научный