

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Попкова Александра Викторовича «Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений их полных выборок», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Диссертационная работа А.В. Попкова посвящена использованию совместного анализа РСДБ-наблюдений активных ядер галактик (АЯГ) и их радиоспектров для исследования ряда взаимосвязей и физических процессов, происходящих в АЯГ. Первой задачей явилось изучение связи между структурой АЯГ на парсековых масштабах с их радиоспектрами в широком диапазоне частот на основе формирования и исследования статистически полной выборки АЯГ, имеющих РСДБ-наблюдения. Другой задачей работы, основанной на мониторинге частотных характеристик статистически полных выборок АЯГ по потоку, явилось изучение вспыхивающей переменности АЯГ, стимулом для которого послужили два знаковых события в наблюдательной радиоастрономии последних лет – это отождествление источника высокоэнергетичных нейтрино с блазаром TXS 0506+056 и обнаружение наземно-космическим радиоинтерферометром «Радиоастрон» экстремальных яркостных температур квазаров. Последнее вызвало интерес к определению несмещенной оценки характерного значения Доплер-фактора джетов АЯГ. В работе дается четкий анализ современного состояния перечисленных проблем, не нашедших до настоящего времени полного решения, что и определяет **актуальность** настоящей диссертационной работы.

Таким образом, **целями и задачами** работы явились: 1) изучение свойств компактных объектов с крутым и плоским спектром на основе статистически полной по радиопотоку выборки АЯГ с имеющимися VLBA-наблюдениями и измеренными спектрами в широком диапазоне радиочастот и на этой основе уточнение долей различных классов объектов в популяции АЯГ; 2) изучение активности блазара TXS 0506+056 и установление связи с его спектральными характеристиками, сравнение его характеристик в радиодиапазоне с характеристиками других источников полной выборки блазаров; 3) получение несмещённых оценок Доплер-факторов джетов АЯГ на основе изучения яркостной температуры радиоядра для полной по плотности РСДБ-потока выборки.

Все поставленные цели работы достигнуты, задачи выполнены. Отмечу, что представленная диссертационная работа хорошо оформлена, написана хорошим научным языком, содержит большое количество иллюстративного материала, содержит минимум опечаток.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 126 страницах, включает 8 таблиц и 26 рисунков, список литературы содержит 167 наименований.

Содержательная часть работы структурирована в полном соответствии с тремя поставленными задачами. Первая глава посвящена изучению связи между структурой джета на парсековых масштабах и спектральными характеристиками АЯГ, вторая глава посвящена изучению активности блазара TXS 0506+056, третья глава – оценке величины Доплер-фактора джетов АЯГ.

В качестве **основного результата** исследования стоит отметить то, что с помощью наблюдений полной по плотности радиопотока РСДБ-выборки АЯГ, охватывающей большую область неба, были установлены статистически значимые корреляции параметров спектра и структуры объектов, что дает возможность оценивать вероятность РСДБ-детектирования источника в зависимости от типа его спектра. В качестве **других значимых результатов** исследования следует назвать открытие десятков новых компактных источников с крутым радиоспектром, результаты многолетних наблюдений широкополосного радиоспектра источника TXS 0506+056 — первого блазара, отождествлённого с высокой достоверностью с источником нейтрино высоких энергий, решение проблемы расхождения оценок величины Доплер-фактора, полученных различными методами, существовавшей много лет.

Положительной стороной проведенных исследований является не только получение значимых научных результатов, но и формулировка практических рекомендаций для их использования, например, для оптимизации РСДБ-наблюдений и достижения большей полноты выборок компактных АЯГ. Необходимо также отметить тот положительный момент, что в работе дается подробное описание всей технологии получения результатов.

В **первой главе** подробно описано формирование статистически полной по потоку выборки АЯГ с VLBA-данными. Описана процедура калибровки и картографирования по VLBA-данным. Дается описание спектров, взятых из литературы. Дается подробный анализ связи параметров, полученных из РСДБ-наблюдений и широкополосных спектров. Проведен статистический анализ установленных связей.

Во **второй главе** дается обзор данных детектора нейтрино IceCube, касающихся блазара TXS 0506+056, приводится кривая блеска источника в диапазоне длин волн от 1.38 до 31 см по данным РАТАН-600. Дается описание радиотелескопа РАТАН-600, методики наблюдений на нём и калибровки полученных данных. Приводится сопоставление особенностей

спектра блазара с моментами регистрации нейтрино. Делаются выводы об отождествлении блазара с источником нейтрино.

В третьей главе проанализированы измерения медианной яркостной температуры радиоядер джетов статистически полной выборки АЯГ в проекте MOJAVE. Дано описание наблюдательной программы MOJAVE. Дается подробное описание алгоритмов обработки данных наблюдений. Получены оценки Доплер-фактора для 447 источников. Характерным значением является  $\delta \approx 10$ . Показано, что большинство источников имеют  $\delta < 50$ . Полученные диссертантом оценки в среднем хорошо согласуются с оценками других авторов, основанными на принципиально ином подходе, анализирующем радиовспышки источников .

Можно отметить также обширный и качественный список цитированной литературы, что свидетельствует о хорошей теоретической подготовке диссертанта. Диссертационная работа А.В. Попкова производит благоприятное впечатление. Автор показал не только хорошую теоретическую подготовку, но и высокую квалификацию и навыки в области обработки радиоастрономических наблюдений, включая РСДБ-картографирование АЯГ, статистического анализа данных и программирования.

### **Научная новизна исследования определяется следующим:**

1. Впервые с помощью РСДБ исследована статистически полная, отобранная по полной плотности радиопотока выборка АЯГ большого объёма (482 объекта), охватывающая большую область. Это позволило получить несмещённые оценки долей компактных объектов с крутым и плоским спектром в популяции АЯГ. Открыто несколько десятков новых компактных объектов с крутым спектром.

2. Впервые обнаружено, что момент регистрации нейтрино от блазара TXS 0506+056 приходится на начало его сильной вспышки в радиодиапазоне. Впервые показано, что в радиодиапазоне данный источник является типичным переменным блазаром, что противоречит выдвигавшемуся ранее предположению о его уникальности.

3. Впервые сформулирован критерий надёжности получения оценок величин Доплер-фактора джетов АЯГ, в основе которого лежит согласие результатов использования принципиально различных, независимых методов для большой выборки объектов, что позволило решить проблему расхождения оценок, существовавшую много лет.

**Достоверность и обоснованность** научных выводов работы не вызывают сомнений, поскольку работа основана на высококласных

наблюдениях с использованием известных астрономических инструментов. Надежность результатов обработки данных подтверждена использованием двух независимых пакетов программ.

**Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.** Установленные в результате проведенных исследований корреляции позволяют глубже разобраться в физических процессах, происходящих в околоядерных областях АЯГ, открывают возможности для уточнения механизмов генерации излучения, наложения определенных теоретических ограничений на физические модели АЯГ. С практической точки зрения определение доли компактных источников с крутым спектром в полной выборке позволяет оценить степень неполноты существующих РСДБ-каталогов, составленных по наблюдениям источников только с плоским спектром. Полученные в данной работе корреляции между свойствами радиоспектра и параметрами парсековой структуры АЯГ позволят оценивать вероятность РСДБ детектирования источника по его спектру и оптимально планировать новые РСДБ-обзоры. Увеличение количества известных компактных внегалактических радиоисточников может привести к уточнению астрометрических каталогов, основанных на внегалактических опорных источниках квазиинерциальной системы координат. Оценка величины Доплер-фактора может быть использована при интерпретации результатов детектирования экстремальных яркостных температур наземно-космическим интерферометром «Радиоастрон».

**Замечаний** по существу диссертации нет. В качестве рекомендации на будущее хотелось бы пожелать диссертанту испытать для восстановления РСДБ-изображений АЯГ методы, основанные на методах амплитудного картографирования (без учета фазовой информации) в сочетании с методом максимальной энтропии в тех случаях, когда применение традиционных методов самокалибровки и CLEAN не дает желаемого результата.

**Полнота представления результатов.** Вся основные результаты диссертации опубликованы в 3 научных статьях, все – в ведущих международных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Две работы опубликованы в изданиях из квартиля Q1. В одной из работ Попков А. В. является первым автором. Все работы выполнены в соавторстве. Личный вклад соискателя четко обозначен. **Автореферат** правильно отражает содержание диссертации.

**Заключение.** Все вышеизложенное позволяет заключить, что диссертация Попкова Александра Викторовича «Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений их полных выборок» является законченным самостоятельным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне. Диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным Положением ВАК РФ о порядке присуждения

степени кандидата наук, а ее автор Попков Александр Викторович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент

А.Т. Байкова

Байкова Аниса Талгатовна

доктор физико-математических наук, ученое звание с.н.с.

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Главный научный сотрудник лаборатории

динамики Галактики

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория

Российской академии наук

196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65, кор.1.

Тел. (812) 363 72 07, электронная почта [bajkova@gaoran.ru](mailto:bajkova@gaoran.ru),  
[anisabajkova@mail.ru](mailto:anisabajkova@mail.ru).

1 августа 2022 г.

Подпись А.Т. Байковой удостоверяю,

ученый секретарь ГАО РАН,

кандидат физ.-мат. наук

О. Ю. Барсунова