

УДК 524.7-77

А. Е. Вольвач¹, Н. С. Кардашев², М. Г. Ларионов²

¹ Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», с. Наукове, Крим

² Астрокосмічний центр Установи Російської академії наук Фізичного інституту ім. П. Н. Лебедева, Москва, Росія

RT-22 КРАО: ПОДГОТОВКА НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ И ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТОВЫХ НАЗЕМНЫХ РСДБ-ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РАМКАХ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН»

Наземно-космічна наукова програма «РадиоАстрон» передбачає проведення досліджень з високим (мікросекунди дуги) кутовим розрізненням морфології і динаміки навколоядерних областей джерел, де відбувається могутнє енерговиділення. Відповідно до наукової кооперації між Україною і Росією ця робота проводиться з використанням 22-м радіотелескопа міліметрового діапазону довжин хвиль RT-22 НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія». Програмою досліджень передбачене проведення робіт з високочутливими радіометрами на частоти 22 і 36.8 ГГц. Це дозволяє одержати спектральні характеристики джерел поблизу частоти 22 ГГц — основної частоти експерименту «РадиоАстрон». Для реалізації проекту підготовляється наукова програма, істотною частиною якої є дослідження компактних утворень усередині позагалактичних джерел і проводяться тестові наземні РНДБ-експерименти.

ФОРМИРОВАНИЕ КАТАЛОГА «РАДИОАСТРОН»

В рамках подготовки научной программы проекта был составлен предварительный каталог радиоисточников, по прогнозам имеющих избытки плотности потока на высоких частотах [2, 9]. Это так называемые объекты с инвертированными спектрами излучения. Такие объекты представляют интерес для космической программы из-за того, что содержат очень компактные области, несущие основную долю потока радиоисточника.

Каталог радиоисточников для полетной программы «РадиоАстрон» формировался на основе уточнения спектральных характеристик источников предварительного каталога по данным наблюдений на RT-22 НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» на частотах 22 и 36.8 ГГц.

Измерения потоков выборки радиоисточников из каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36.8 ГГц. Измерения плотности потоков радиоисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон» были выполнены на частотах 22 и 36.8 ГГц с помощью 22-м радиотелескопа RT-22

в соответствии с кооперационной программой исследований России и Украины по космическому проекту «РадиоАстрон». Значительная доля исследуемых источников представляла собой слабые объекты с потоком менее 1 Ян на указанных частотах, поэтому наблюдения данных объектов — длительная и кропотливая процедура, требующая применения специальных методик. Наблюдения на обеих частотах проводились при помощи модуляционных радиометров. Калибровка и корректировка потоков источников проводилась с использованием стандартных процедур «привязки» по калибровочным источникам и учетов изменения параметров антенны в зависимости от азимута и угла места.

Построение статистических зависимостей « $\log N - \log S$ » и «число источников с инвертированными спектрами — поток». Во время наблюдений на двух частотах были получены данные по спектральным характеристикам источников в миллиметровом диапазоне длин волн. Объекты, по спектральным характеристикам не удовлетворяющие критерию компактных источников, удалялись из списка. Для количественной оценки неполноты полученного списка радиоисточников строилась экстраполированная за-

висимость подсчетов числа источников (« $\log N - \log S$ ») на частоте 22 ГГц [10] (рис. 1). Сравнивая плотности источников в результирующем каталоге «РадиоАстрон» и полученные на основе построенной зависимости « $\log N - \log S$ », а также числа источников с инвертированными спектрами на частоте 22 ГГц (рис. 2), можно оценить предполагаемое число объектов с указанными спектральными характеристиками на северном небе до потока 0.25 Ян.

Результаты вычислений с использованием указанных зависимостей приводят к следующим выводам. Число источников на частоте 22 ГГц с потоками $S \geq 0.25$ Ян для северного неба (6.28 стер) составляет 1860 ± 20 . С использованием зависимости «число источников с инвертированными спектрами — поток» можно ожидать наличия в общем списке источников около 1/3 объектов с инвертированными спектрами (для северного неба — 620 источников). Это означает, что в начальном списке из 1250 источников может находиться около половины объектов, имеющих отрицательные спектральные индексы на частоте 22 ГГц и не удовлетворяющих критерию компактных объектов. Данные источники исключались из начального списка в результате спектральных наблюдений на 22 и 36.8 ГГц.

Сравнение оптических и радиосвойств источников каталога «РадиоАстрон». Для исследования оптических свойств радиоисточников каталога «РадиоАстрон» по сравнению с объектами, представляющими собой полные выборки источников в радиодиапазоне, проведен сравнительный анализ оптических и радиохарактеристик источников каталога. Использовалась выборка радиоисточников каталога «РадиоАстрон» в диапазоне склонений $0-20^\circ$, общая с исследованными радиоисточниками обзора 87 GB. Использовалась выборка радиоисточников в диапазоне склонений $0-20^\circ$, общая с исследованными радиоисточниками обзора 87 GB. Полнота последнего равна 50—100 мЯн, что в 2.5—5 раз ниже уровня потока для выборки радиоисточников в каталоге «РадиоАстрон».

В каталог «РадиоАстрон» были отобраны объекты с инвертированными спектрами с потоками более 250 мЯн. Количество оптически отожд-

ествленных источников в каталоге «РадиоАстрон» возросло до 75 % (против 38 % в выборке 87 GB). Это указывает на то, что в среднем выборка объектов каталога «РадиоАстрон» содержит более мощные источники по сравнению с полной выборкой 87 GB, что вполне естественно, так как в подавляющем большинстве это активные ядра галактик.

Количество отождествленных галактик оказалось в шесть раз меньше по сравнению со звездными объектами. Все объекты в оптическом диапазоне имеют субсекундные размеры, что определяется в основном разрешением оптического телескопа. За счет изменения выборки, а не за счет эволюции за период наблюдений, претерпели изменения и цветовые характеристики звездных источников — их цвет из нейтрального переместился в сторону красного. Этот эффект, возможно, связан с изменением эволюционных свойств источников в выборке каталога «РадиоАстрон», где доля удаленных и мощных источников выше.

Полученные результаты по изменению свойств источников каталога «РадиоАстрон» указывают, что наряду с работой «центральной маши-

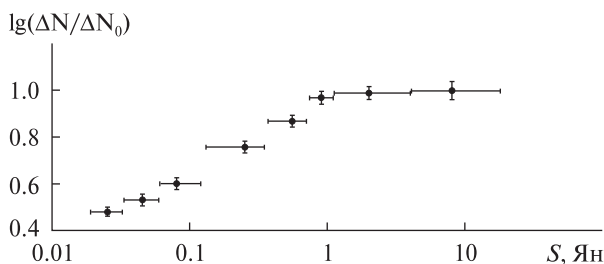


Рис. 1. Дифференциальная зависимость подсчета источников

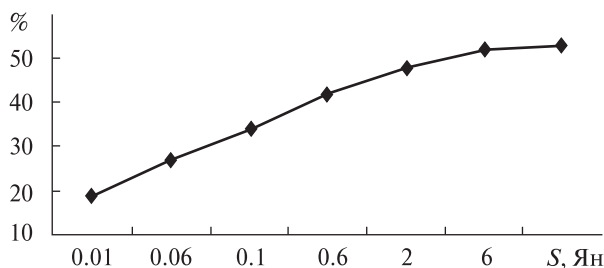


Рис. 2. Доля источников с инвертированными спектрами

ны» в космологически удаленных источниках активные процессы звездообразования в околоядерных областях поставляют значительную пылевую составляющую. За счет этого может трансформироваться и цвет источников. Наличие одновременно вспышек звездообразования и активности в ядрах может служить косвенным указанием на космологическую удаленность объектов, так как увеличение скорости звездообразования напрямую связано с увеличением красного смещения источников.

Таким образом, оптические свойства источников каталога «РадиоАстрон» заметным образом отличаются от средних характеристик объектов полной выборки в радиодиапазоне. А часть из 25 % неотожествленных радиоисточников могут представлять собой сильно удаленные объекты с пылевыми коконами, препятствующими их выделению в оптике на уровне 21^m . Около 50 % источников в списке «РадиоАстрон», как уже упоминалось, могут иметь отрицательные спектральные индексы и принадлежать к классу радиогалактик и компактных галактик и быть оптически более слабыми чем 21^m [10].

Измерения потоков выборки 110 радиоисточников из каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36.8 ГГц. Выполнены измерения плотности потоков радиоисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36.8 ГГц с помощью радиотелескопа РТ-22. На первом этапе выполнены наблюдения 110 радиоисточников из предварительного списка «РадиоАстрон» [10].

Полученное среднее значение спектрального индекса для всех источников оказалось равным $\alpha_{\text{cp}} = -0.01$. Подобное значение получено и для источников каталога WMAP. Разница заключается в том, что исследуемая выборка имеет существенно более низкий средний уровень потоков, чем выборка WMAP, и, следовательно, если бы она была полной, то среднее значение спектрального индекса α_{cp} было бы отрицательным в силу зависимости α_{cp} от потока. Благодаря методике отбора источников в каталог «РадиоАстрон» в нем оказалось больше источников с инвертированными спектрами, чем в полной выборке при данном значении среднего потока.

Наличие в исследуемом каталоге радиоисточников значительного количества объектов с отрицательными спектральными индексами не явилось неожиданностью. Определенная часть источников, имеющих инвертированные спектры на дм- и см-длинах волн, на мм-длинах волн обнаруживает уменьшение спектральной плотности потока с частотой. Это видно на примере известных объектов 0316+413, 1226+023, 1334-127, 1611+343 и ряде других. Именно частотный диапазон 20—40 ГГц является переходным от радио- к субмиллиметровым волнам и далее к оптическим. И если спектр интерполируется единой зависимостью, как в перечисленных источниках, то наблюдаемое уменьшение плотности потока представляется естественным, как и полученный нами результат по среднему спектральному индексу источников рассматриваемой выборки.

На рис. 3 приведена гистограмма распределения спектральных индексов измеренной выборки источников. Как и следовало ожидать, полученное распределение схоже с распределением спектральных индексов радиоисточников каталога WMAP, где также среднее значение спектрального индекса α_{cp} близко к нулю. Однако дисперсия распределения больше за счет отбора источников, имеющих инвертированные спектры.

Исследование источников каталога WMAP. Каталог WMAP, полученный с космического аппарата, включает в себя сильные радиоисточники на небе (более 1.5 Ян). Представляло интерес сравнить спектральные характеристики и параметры переменности потоков излучения источников каталога WMAP и объектами результирующего каталога «РадиоАстрон». Для этой цели с использованием радиотелескопа РТ-22 НИИ КраО на частотах 22 и 36.8 ГГц получены наблюдательные данные полной выборки радиоисточников каталога WMAP для положительных склонений [4].

Полученный каталог РТ-22 содержит данные по потокам источников на указанных частотах, спектральные индексы между двумя частотами для 167 объектов северного неба. В процессе проведения наблюдений в нескольких источниках были зафиксированы вспышки, которые

привели к резкому изменению потоков и спектральных индексов. Распределение спектральных индексов источников в оригинальном каталоге WMAP и в каталоге РТ-22 (рис. 4) имеет схожую форму и дисперсию, что может свидетельствовать о подобии средних характеристик выборки, полученной из наблюдений мгновенных спектров источников и независимых наблюдений с разнесением по времени на разных частотах.

Как и при наблюдениях с космического аппарата WMAP полученный средний спектральный индекс полной выборки источников близок к нулевому значению. Характер распределения спектральных индексов указывает на то, что основная часть объектов имеет плоские и инвертированные спектры.

Сравнение полученных данных с экстраполированными значениями с низких частот показывает совпадение усредненных характеристик выборки на фоне значительного отличия индивидуальных параметров для каждого источника. Это связано с тем, что около половины объектов на высоких частотах имеют искривленные спектры.

Поведение статистической зависимости « $\log N - \log S$ » подтверждает вывод о том, что основную долю объектов высокочастотных обзоров на уровнях потоков 1 Ян и больше представляют квазары и связанные с ними активные галактические ядра. Статистика оптических отождествлений полностью согласуется с указанным выводом. Как следствие состава популяций в обзоре подавляющая доля объектов являются переменными источниками. Уровень переменности находится в обратной зависимости от ее амплитуды.

Внутренние структуры и физические характеристики АЯГ. 1. По полученным экспериментальным данным долговременного мониторинга потоков АЯГ определен класс объектов, состоящих из двух тесных сверхмассивных черных дыр и центрального аккреционного диска. Оценено время жизни ДСЧД до слияния, которое может указывать на то, что системы находятся на фазе эволюции, близкой к слиянию. С целью поиска периодических составляющих изменений потоков излучения выполнен гармонический анализ наблюдательных рядов данных. Впервые полу-

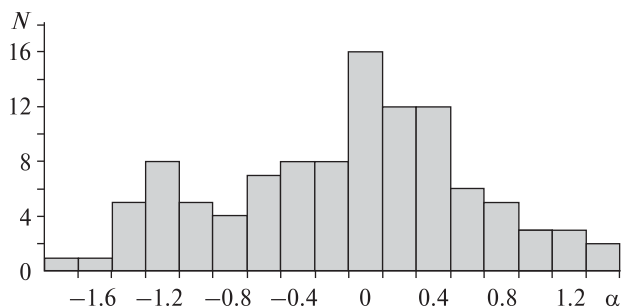


Рис. 3. Распределение числа радиоисточников в зависимости от спектрального индекса

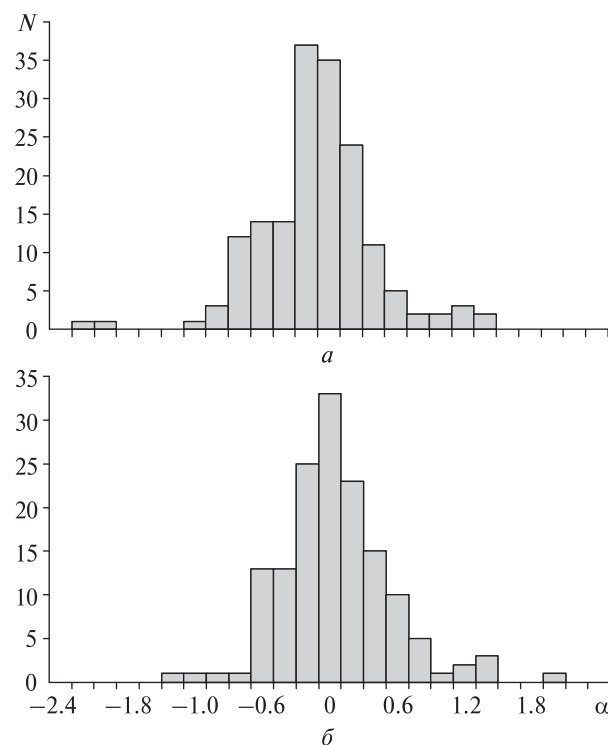


Рис. 4. Распределение источников по значениям спектральных индексов α : а — РТ-22, б — WMAP

чены параметры орбит компаньонов двойных систем, периоды прецессии центральных тел и время жизни до слияния АЯГ 0716+714, 3С454.3, 3С120, 1308+326, ОJ287, ВL Лас. Показано, что в рассмотренной модели есть ограниченный диапазон допустимых значений радиусов орбит компаньонов от $3 \cdot 10^{16}$ до 10^{18} см [1, 6, 7].

2. Впервые комплексно рассмотрен вопрос об источниках первичного выделения энергии

в АЯГ с использованием кинематических и динамических характеристик ДСЧД. Предложена новая концепция первичного энерговыделения, которая базируется на преобразовании кинетической энергии движения компаньонов ДСЧД в ударные волны, распространяющиеся в аккрецирующей газовой среде. Для источника 3С 454.3 впервые получены параметры среды в границах орбиты движения компаньона: температура, плотность, объемная светимость. В рассмотренной модели предполагается наличие всенаправленного излучения, выходящего из среды с магнитным полем. Энергия, передаваемая в направленные джеты, может составлять всего несколько процентов от общей энергии, выделенной компаньоном за счет потери его орбитального момента [5, 8, 11].

3. На основе длительного мониторинга АЯГ на одиночных антеннах и методом РСДБ, проведен анализ соответствия возникновения мощных вспышек интегрального излучения с эпохами рождения ярких РСДБ-компонентов, которые появляются на изображениях РСДБ через несколько месяцев после вспышки. Анализ эволюции потоков и структуры 32 компактных внегалактических радиоисточников позволил выделить вспышки, связанные с возникновением первичного возмущения в ядре. В большинстве объектов следует ожидать появления новых компонентов в ядрах, выявить которые можно с помощью РСДБ-наблюдений. Для АЯГ 3С120, ОJ287, 1308+326, VL Lac получены новые данные сопоставления моментов рождения компонентов РСДБ со вспышками, зарегистрированными по данным многочастотного мониторинга на одиночных радиотелескопах [12].

4. Для АЯГ 0133+476, 1633+382, 2134+004, 2145+067 и 2251+158 получены новые синхронные данные в оптическом и радиодиапазонах, выполнен их анализ. Выявлены достоверные изменения быстрой переменности плотности потоков источников. Отсутствие заметной корреляции изменений плотности потока в различных диапазонах длин волн может указывать на то, что мы наблюдаем явление переменности после того, как сформируются условия острой направленности излучения в коллимированном

пучке выброса из полярной области системы «центральная черная дыра — внутренние области аккреционного диска» [3].

Тестовые наземные РСДБ-сеансы. Проведена модернизация аппаратуры и отработаны современные методы наблюдений необходимые для работы РТ-22 в глобальной РСДБ-сети. Радиотелескоп оснащен аппаратурой, необходимой для РСДБ-исследований космических объектов в миллиметровой области спектра: специализированными высокоскоростными устройствами регистрации данных «Марк-5А», «Марк-5В+», терминалом регистрации в режиме квазиреального времени, водородным стандартом частоты и времени со стабильностью 10^{-15} . Эти нововведения дали возможность продолжить исследования сверхтонкой структуры источников космического радиоизлучения в диапазоне от миллиметровых до метровых длин волн, проводить наблюдения астероидов, планет земной группы и мониторинг космического мусора с помощью объединения методов РСДБ и классической радиолокации.

В плане отработки наземно-космической миссии «РадиоАстрон» были подготовлены и проведены наземные РСДБ-эксперименты в модах проекта: использовались верхние и нижние боковые полосы приема в правой и левой круговых поляризациях. Наблюдения проводились на двух идентичных радиотелескопах РТ-22 в Пушино (Россия) и в Симеизе (Украина).

Первый РСДБ-сеанс наблюдений был выполнен в октябре 2009 г. на длине волны 6 см. Регистрация данных производилась в полосах 4 МГц, в Симеизе на дисковые регистраторы системы «Марк 5А», а в Пушино — на РДР-1 (формат S2). Синхронизация систем в двух пунктах обеспечивалась водородными стандартами и системой времени GPS. Для наблюдений были выбраны два источника 3С 454.3 и S 0528+134 (Nimfa). Первый, более сильный источник, использовался для уточнения фазовых движений и офсетных параметров в каждом пункте наблюдений. Второй, более слабый объект, планировался для отработки времени когерентного усреднения.

В повторном РСДБ-сеансе на 6 см, который был проведен в июне 2010 г. с модернизированной

ной аппаратурой в Пушино, удалось реализовать планируемое время когерентного накопления (300 с по проектному заданию программы «РадиоАстрон»). Наблюдались источники ЗС 273 и 1055+018. На последнем, слабом источнике, проводилась отработка максимального времени когерентного усреднения данных интерферометрических наблюдений.

Минимальная длина волны наблюдений, планируемая в проекте «РадиоАстрон» — 1.35 см. В этой связи в мае 2010 г. был проведен сеанс интерферометрии между указанными радиотелескопами на длине волны 1.35 см в непрерывном спектре и в линиях H_2O вблизи частоты 22 ГГц.

Во всех экспериментах были получены и прокалиброваны амплитуды и фазы кросскорреляционных функций и их ход со временем. Проведенные РСДБ-сеансы показали работоспособность аппаратурных средств радиотелескопа РТ-22 (Симеиз) и его готовность к участию в дальнейших интерферометрических сеансах. После проведения модернизации РТ-70 (Евпатория) РСДБ-наблюдения будут продолжены с участием этой антенны по программе «РадиоАстрон».

1. Вольвач А. Е. Двойные системы из сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Кинематика и физика небес. тел. — 2009. — 25, № 5. — С. 385—401.
2. Вольвач А. Е. Каталог источников для полетной программы «РадиоАстрон» // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 6. — С. 28—43.
3. Вольвач А. Е., Бычкова В. С., Кардашев Н. С. и др. Быстрые изменения блеска блазаров в радио- и оптическом диапазонах // Астрон. журн. — 2009. — 86, № 5. — С. 440—448.
4. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. Исследование источников каталога WMAP // Астрон. журн. — 2008. — 85, № 6. — С. 483—497.
5. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М., Ларионов М. Г. Характеристики среды вблизи сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Кинематика и физика небес. тел. Приложение. — 2009. № 6. — С. 93—97.
6. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М. и др. Субпарсековая структура двойных сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Астрон. журн. — 2010. — 87, № 1. — С. 33—42.

7. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др. Переменность излучения блазара ЗС 454.3 за период 40 лет // Астрон. журн. — 2007. — 84, № 6. — С. 503—513.
8. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др. Корреляция развития вспыхивающего явления в блазаре ЗС454.3 в радио- и оптическом диапазонах // Астрон. журн. — 2008. — 85, № 9. — С. 1—9.
9. Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. Об исследовании компактных радиоисточников для программы «РадиоАстрон» // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга. — 2004. — 75. — С. 184—185.
10. Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. и др. Исследование статистических и спектральных характеристик радиоисточников каталога «РадиоАстрон» в мм диапазоне длин волн // Кинематика и физика небес. тел. — 2007. — 23, № 3. — С. 174—185.
11. Вольвач А. Е., Пушкарев А. Б., Вольвач Л. Н. и др. Структуры, переменность и вспыхивающая активность четырех объектов типа VL Lac // Кинематика и физика небес. тел. Приложение. — 2009. — № 6. — С. 85—92.
12. Вольвач А. Е., Пушкарев А. Б., Вольвач Л. Н. и др. Эволюция потоков и парсековой структуры компактных внегалактических радиоисточников по результатам мониторинга на частотах 4.8—36.8 ГГц и картографирования по геодезическим РСДБ-наблюдениям // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 4. — С. 33—57.

Надійшла до редакції 17.12.10

A.E.Volvach, N.S. Kardashev, M.G. Larionov

THE RT-22 OF THE CRAO: SCIENTIFIC PROGRAM ELABORATION AND PERFORMANCE OF GROUND-BASED VLBI TEST EXPERIMENTS WITHIN THE FRAMEWORK OF THE PROJECT «RADIOASTRON»

The Earth-space science program «RadioAstron» includes high-resolution (microseconds of arc) study of the morphology and dynamics of the circumnuclear regions of sources of powerful energy. In accordance with the scientific cooperation between Ukraine and Russia, the study is carried out using the 22-m radio telescope RT-22 of the SRI «Crimean Astrophysical Observatory». The research program provides the investigation with highly sensitive radiometers at frequencies of 22 GHz and 36 GHz. This makes it possible to obtain spectral characteristics of the sources near a frequency of 22 GHz, which is the fundamental frequency of the experiment «RadioAstron». To realize the project, the scientific program is developed, a substantial part of which is the study of compact structures in extragalactic sources, and ground-based VLBI test experiments are conducted.