

УДК 524.7

А. Е. Вольвач¹, Н. С. Кардашев², М. Г. Ларионов²,
Л. Н. Вольвач¹, И. Д. Стрепка¹

¹Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, п. Научный

²Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН
117810 Россия, Москва, ул. Профсоюзная 84

Исследование статистических и спектральных характеристик радиисточников каталога «РадиоАстрон» в миллиметровом диапазоне длин волн

Рассмотрены статистические характеристики радиисточников на частоте 22 ГГц в рамках подготовки полетной программы «РадиоАстрон». Оценена ожидаемая плотность радиисточников с инвертированными спектрами. Проведены наблюдения радиисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон» и выполнено сравнение ожидаемых и измеренных угловых плотностей радиисточников с инвертированными спектрами. Сравниваются оптические свойства объектов с инвертированными спектрами и источников полной выборки поисковых обзоров. Приведены спектральные характеристики выборки радиисточников, измеренных на двух частотах. Сделаны выводы о полноте и достоверности предварительного каталога «РадиоАстрон».

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ І СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОДЖЕРЕЛ КАТАЛОГУ «РАДІОАСТРОН» У МІЛІМЕТРОВУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ, Вольвач О. Є., Кардашов М. С., Ларіонов М. Г., Вольвач Л. Н., Стрепка І. Д. — Розглянуто статистичні характеристики радіоджерел на частоті 22 ГГц у рамках підготовки польотної програми «РадіоАстрон». Оцінено очікувану щільність радіоджерел з інвертованими спектрами. Проведено спостереження вибірки радіоджерел з попереднього каталогу «РадіоАстрон» і виконано порівняння очікуваних і вимірюваних кутових щільностей радіоджерел з інвертованими спектрами. Порівнюються оптичні властивості об'єктів з інвертованими спектрами та джерел повної вибірки пошукових оглядів. Приведено спектральні характеристики вибірки радіоджерел, виміряних на двох частотах. Зроблено висновки про повноту і достовірність попереднього каталогу «РадіоАстрон».

THE RESEARCH OF SOME STATISTICAL AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE RADIO SOURCES FROM THE RADIOASTRON CATALOGUE AT WAVELENGTHS OF THE ORDER OF 1 MM, by Volvach A. E., Kardashev N. S., Larionov M. G., Volvach L. N., Strep-

ka I. D. — In the framework of the preparation of the RadioAstron mission the statistic performance of the radio sources at 22 GHz is considered. The expected density of the radio sources with inverted spectra is estimated. A sample of radio sources from the preliminary RadioAstron catalogue is observed. The comparison of the expected and measured angular densities of the radio sources with the inverted spectra are performed. Optical properties of the objects with the inverted spectra are compared with ones of the complete sample sources of searching surveys. The spectral characteristics of the sample of the radio sources which were measured at two frequencies are presented. The conclusion on the completeness and reliability of the preliminary RadioAstron catalogue are made.

ВВЕДЕНИЕ

Интерферометрическая программа наземно-космического проекта «РадиоАстрон» призвана решить ряд фундаментальных астрофизических задач, связанных с установлением физической природы активных галактических и внегалактических источников излучения. Среди круга задач, планируемых для решения, — исследование ядер активных галактик, релятивистских галактических объектов, пульсаров, областей образования звезд и планетных систем. Программа исследования внегалактических источников и релятивистских галактических объектов составляет важную и заметную часть в общей программе наблюдений.

Одной из главных астрофизических загадок остается физическая природа механизма энерговыделения «центральной машины», скрытой в ядерных областях активных галактических и внегалактических объектов. До настоящего времени неизвестно, до какого уровня компактности проявляется физическая природа активных ядер галактик. Наличие в них высококоллимированных струйных явлений и компактных выбросов (блотов) приводит к мысли о существовании очень компактных образований внутри таких нестационарных объектов [15, 16].

Для внегалактических источников, находящихся на расстояниях десятков и сотен мегапарсек, угловые масштабы в микросекунду дуги соответствуют размерам массивных и сверхмассивных черных дыр 10^{14} — 10^{15} см. Такие объекты могут показывать быструю (дни и часы) переменность потока излучения, присущую окооядерным структурам, где расположен главный источник энерговыделения [18]. Именно такое угловое разрешение и планируется реализовать в наземно-космическом эксперименте «РадиоАстрон». Поэтому перспективными кандидатами для наблюдений по программе «РадиоАстрон» будут источники, не разрешаемые со сверхдлинными наземными базами (РСДБ).

Наземная подготовка к эксперименту «РадиоАстрон» включает в себя составление полетной программы, заметную долю в которой занимает создание списка активных компактных внегалактических объектов. Предварительный каталог компактных внегалактических радиоисточников для космического эксперимента «РадиоАстрон» содержит около 1250 объектов северного неба. Источники предположительно имеют избытки спектральной плотности потока вблизи частоты 22 ГГц. Каталог скомпилирован до уровня потоков 0.2—0.3 Ян по экстраполяции на частоту 22 ГГц [3]. Ситуация осложняется тем, что основная доля источников при наблюдениях на высоких частотах — это слабые объекты с потоками около 1 Ян и меньше, что объясняется спектральными характеристиками большинства источников, спектральная плотность излучения которых уменьшается с увеличением частоты. Доля объектов с инвертированными спектрами невелика, но

именно такие источники необходимы для проведения научной программы «РадиоАстрон».

Значительная переменность потока у интересующих нас источников приводит к необходимости проведения повторных просмотров источников спустя год-два. Другими словами, мы должны предварительно отобрать объекты с указанными спектральными свойствами и затем проводить их мониторинг в течение времени, когда готовится эксперимент и в процессе его выполнения. Знание интегральных потоков необходимо и для выполнения интерферометрических привязок по потоку. Таким образом, необходимость исследования нестационарных объектов определяется их научной (а в дальнейшем, возможно, и практической) значимостью.

ФОРМИРОВАНИЕ КАТАЛОГА «РАДИОАСТРОН»

Каталог радиоисточников для полетной программы «РадиоАстрон» формировался в два этапа: 1) составление предварительного списка объектов по данным известных каталогов и наблюдений отдельных источников; 2) уточнение спектральных характеристик источников предварительного каталога на частотах выше 10 ГГц с использованием наблюдательных программ.

Используя известные списки источников на частотах ниже 10 ГГц, мы отобрали объекты, имеющие инвертированные спектры $\alpha \geq 0$ (связь между потоком S , частотой наблюдения ν и спектральным индексом α устанавливалась соотношением $S \propto \nu^\alpha$) и предположительно имеющие экстраполированные потоки на частоте 22 ГГц больше 0.25 Ян. Кроме РТ-22 Научно-исследовательского института «Крымская астрофизическая обсерватория» наблюдения отдельных радиосточников на частотах 22 и 37 ГГц проводятся на 13.7-м антенне в Метсахови [20].

Полученный список 1250 объектов не был полным по заданным параметрам. Он не содержал источников с сильно растущими в сторону коротких волн плотностями потоков. Такие объекты могли быть найдены только в результате проведения поисковых обзоров неба на высоких частотах. Кроме того, в список могли не быть включены источники, у которых на высоких частотах обнаруживаются компактные компоненты. Такие объекты имеют на низких частотах нормальные спектры, и поэтому исключаются из списка предварительного каталога «РадиоАстрон». Доля тех и других объектов заранее неизвестна. С другой стороны, в предварительном каталоге «РадиоАстрон» могли быть источники, потоки которых на частоте 22 ГГц ниже указанной границы 0.25 Ян. Эти радиоисточники предстояло определить и удалить из общего списка «РадиоАстрон».

Для количественной оценки неполноты списка и наличия в нем объектов, не удовлетворяющих заданным спектральным характеристикам, применялась следующая схема. По данным имеющихся поисковых обзоров строилась статистическая зависимость подсчетов числа источников в зависимости от потока на частоте 22 ГГц ($\lg N - \lg S$). Из-за отсутствия поисковых обзоров на указанной частоте зависимость $\lg N - \lg S$ компилировалась по данным обзоров, выполненных на более низких частотах. На основе указанной зависимости можно было определить угловую плотность источников для каждого заданного уровня потока. Зная угловую плотность источников на небесной сфере в зависимости от потока, можно было определить долю источников с инвертированными спектрами и их угловую плотность в зависимости от потока на частоте 22 ГГц. Для этого необходимо использовать спектральные характеристики источников из данных имеющихся радиообзоров.

**ПОСТРОЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ $\lg N - \lg S$
И ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА ИСТОЧНИКОВ С ИНВЕРТИРОВАННЫМИ
СПЕКТРАМИ ОТ ПОТОКА**

Для построения статистической зависимости подсчетов источников в области сильных потоков использовался трехчастотный Зеленчукский обзор, выполненный лабораторией ГАИШ на радиотелескопе РАТАН-600 на частотах 3.9, 8.7 и 14 ГГц [1.2.4] и обзор практически всей небесной сферы WMAP на частоте 30 ГГц [8]. Обзор WMAP, выполненный на космическом аппарате с диаметром зеркала около 1 м, ограничивался уровнем путаницы на уровне потоков 0.7—1 Ян в зависимости от просматриваемого участка небесной сферы. Зеленчукский обзор охватывал участок северного неба площадью около 1.5 стерадиан до уровней потоков 40, 350 и 750 мЯн соответственно на указанных выше частотах. Обзор WMAP, в совокупности с трехчастотным Зеленчукским обзором, позволил получить хорошие интерполяционные значения угловых плотностей источников в области сильных потоков.

Для средних (0.1—1 Ян) и слабых (20—100 мЯн) потоков были использованы обзоры Douglas на частоте 365 МГц [11], GB6 на частоте 5 ГГц [12], NVSS [10] и FIRST на частоте 1.4 ГГц [7]. Эти обзоры охватывали большую часть небесной сферы и результаты, полученные на их основе, обладали высокой достоверностью. Как базовые использовались обзоры 9C, проведенные с помощью Ryle Telescope и выполненные на частоте 15 ГГц в трех площадках общей площадью 520 кв. градусов (0.15 стер) [19, 21]. Минимальный поток источников в обзоре составлял около 10 мЯн.

Зеленчукский обзор, выполненный на трех частотах одновременно в диапазоне склонений $0...14^\circ$ вне плоскости Галактики $\pm 5^\circ$ от b^{II} , позволил получить данные по мгновенным спектрам примерно для 100 источников. Эти данные были использованы для вычисления экстраполированной зависимости $\lg N - \lg S$ на частоте 22 ГГц в области сильных потоков. Мгновенные спектры источников были определены до частоты 14.4 ГГц. Среди источников Зеленчукского обзора на частоте 14.4 ГГц примерно половина — источники с инвертированными спектрами ($\alpha \geq 0$). Подовина объектов с сильными потоками имели спектральные индексы $\alpha_{\text{сил}} = 0.11 \pm 0.15$, в то время как со слабыми — $\hat{\alpha}_{\text{слаб}} = -0.17 \pm 0.15$. Наметившаяся зависимость спектрального индекса от плотности потока не является статистически достоверной, так как в каждой выборке было примерно по 50 объектов. Интересно отметить, что по данным обзора WMAP доля источников с инвертированными спектрами также составляет 50%. Это позволяет сделать вывод, что для сильных источников средний спектральный индекс равен $\alpha \approx 0$ в диапазоне частот 15—30 ГГц.

Дополнительный источник информации по спектральным характеристикам объектов был получен из данных обзора WMAP, где имелась информация о потоках сильных источников с потоками 1-2 Ян на четырех участках частот выше частоты 22 ГГц. В области средних и слабых потоков для построения зависимости $\lg N - \lg S$ на частоте 22 ГГц, кроме знания зависимости $\lg N - \lg S$ на частоте 15 ГГц, необходимо также иметь информацию о спектральных характеристиках всех источников обзора. Для этой цели использовались данные низкочастотных обзоров Douglas, GB6, NVSS и FIRST.

Для каждого источника обзора на частоте 15 ГГц были определены спектральные характеристики и посчитаны экстраполированные потоки на частоте 22 ГГц. Похожая стратегия была использована при построении

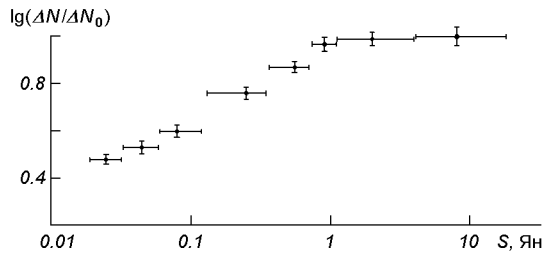


Рис. 1. Дифференциальная зависимость количества источников от потока

зависимости $\lg N$ — $\lg S$ на частоте 33 ГГц для вычитания вклада источников в космический микроволновый фон при наблюдениях с инструментом VSA (Very Small Array) [9].

Найденная нами дифференциальная зависимость $\lg \Delta N$ от $\lg S$ для частоты 22 ГГц, нормированная на значение ΔN_0 для эвклидовой Вселенной, показана на рис. 1. Нормировка зависимости выполнена по участку $\lg N$ — $\lg S$ на частоте 14.4 ГГц из условия $N(S > 1 \text{ Ян}) = 45$.

В полученной зависимости $\lg N$ — $\lg S$ в области сильных источников имеется диапазон, где статистика подчиняется закону $3/2$, далее идет монотонное уменьшение плотности источников по отношению к плотности для эвклидовой Вселенной. Схожесть подсчетов источников на частоте 22 и 30 ГГц в диапазоне сильных потоков может указывать на то, что, несмотря на возможную зависимость спектрального индекса от потока $\alpha(S)$, она не распространяется на область сильных потоков [8]. Тем самым мы можем прогнозировать зависимость спектрального индекса от потока для объектов с потоками менее 1 Ян.

Располагая спектральными характеристиками источников на частоте 15 ГГц и статистической зависимостью $\lg N$ — $\lg S$ на частоте 22 ГГц, можно оценить число источников с инвертированными спектрами в зависимости от величины потока на частоте 22 ГГц (рис. 2). Отличительной особенностью полученной зависимости является монотонное уменьшение количества объектов с инвертированными спектрами от 55 % для сильных источников до 15 % для источников на уровне 10 мЯн. Похожие результаты были получены на частоте 31 ГГц для небольшой выборки источников из каталога NVSS с потоками больше 6 мЯн [17], где число объектов с инвертированными спектрами составило около 12 %.

Большое число источников с инвертированными спектрами, растущее в сторону коротких волн, приводит к увеличению энергетического вклада дискретных объектов в фоновое излучение на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Полученные нами данные позволяют оценить степень полноты содержания объектов с отрицательными спектральными индексами в предварительном каталоге источников с инвертированными спектрами — каталоге «РадиоАстрон», включающем 1250 источников на площади 5.85 стерадиан до уровня потоков 0.25 Ян.

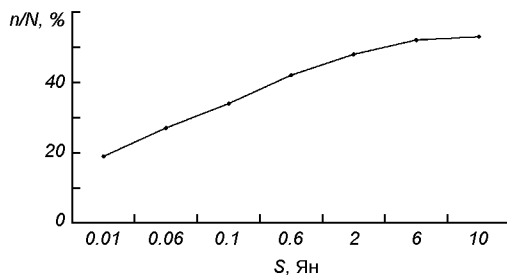


Рис. 2. Доля источников с инвертированными спектрами

Располагая зависимостью $\lg N - \lg S$ и количеством источников с инвертированными спектрами на частоте 22 ГГц, можно посчитать предполагаемое число объектов с указанными спектральными характеристиками на северном небе до потока 0.25 Ян, используя нормировку по концу статистической зависимости подсчетов источников для сильных потоков $N (S > 1 \text{ Ян}) = 40$.

Результаты вычислений с использованием указанных зависимостей приводят к следующим выводам.

1. На основе полученной зависимости $\lg N - \lg S$ для частоты 22 ГГц можно получить число источников на стерадиан с потоками $S \geq 0.25 \text{ Ян}$ ($N_{S=0.25} = 290$). Здесь выполнена нормировка для угловой плотности источников $N (S > 1 \text{ Ян}) = 45$. Для северного неба (6.28 стер) мы будем иметь около 1860 источников с потоками более 0.25 Ян.

2. На основе зависимости количества источников с инвертированными спектрами от потока можно ожидать наличия в общем списке источников около трети объектов с инвертированными спектрами. Для северного неба это составит 620 источников с потоками более 0.25 Ян.

Это означает, что в начальном списке из 1250 источников может находиться до половины объектов, имеющих отрицательные спектральные индексы на частоте 22 ГГц. Данные источники должны быть выделены при наблюдениях спектральных характеристик вблизи частоты 22 ГГц и удалены из списка объектов, включенных в полетную программу «РадиоАстрон».

СРАВНЕНИЕ РАДИО- И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 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 в диапазоне склонений $0 \dots 20^\circ$, общая с исследовавшимися радиоисточниками обзора 87 GB. Полнота последнего находится на уровне 50—100 мЯн, что несколько ниже уровня потока для выборки радиоисточников в каталоге «РадиоАстрон». Оптические параметры объектов были взяты из работы Лоуренса [14].

Для выборки радиоисточников каталога 87 GB на частоте 5 ГГц по пластинкам Паломарского обзора неба на уровне 21^m отождествляется около 40 % радиоисточников, из которых половина составляют галактики и половина — звездные объекты. При этом считается, что все объекты выборки являются внегалактическими источниками. Для источников этой выборки была установлена эмпирическая зависимость между средними оптическими и радиосвойствами для галактик и звездообразных объектов:

$$m_{RG} - m_{RS} \approx 2.5(\lg P_S - \lg P_G),$$

где m_{RG} и P_G — средняя величина и средний радиопоток галактик на красных пластинках; m_{RS} и P_S — средняя величина и средний радиопоток звездных объектов на голубых пластинках.

Полученное соотношение является отражением того факта, что на голубых пластинках галактики и звездные объекты имеют практически одинаковые средние величины. На красных пластинках свойства их отличаются: средний спектральный индекс звездных источников близок к нулю (они имеют нейтральный цвет), галактики же имеют красные избытки излучения.

Ситуация изменилась при анализе источников каталога «РадиоАстрон». Каталог не содержит полной выборки радио источников, как список 87 GB,

представляющий собой поисковый обзор до определенного уровня потока. В каталог «РадиоАстрон» были отобраны объекты с инвертированными спектрами с потоками более 250 мЯн. Количество оптически отождествленных источников в каталоге «РадиоАстрон» увеличилось до 75 % (против 38 % в выборке 87GB). Другими словами, выборка объектов каталога «РадиоАстрон» содержит в среднем более мощные источники, чем полная выборка 87 GB. В подавляющем большинстве это активные ядра галактик.

Количество отождествленных галактик оказалось в шесть раз меньше, чем количество звездных объектов. Нет источников, имеющих структуру — все объекты в оптическом диапазоне имеют субсекундные размеры (разрешение оптического телескопа). Нейтральный цвет звездных источников изменился на красный. Этот эффект, возможно, связан с изменением эволюционных свойств источников в выборке каталога «РадиоАстрон», где доля удаленных и мощных источников выше.

Особенности свойств источников каталога «РадиоАстрон» указывают, что наряду с работой «центральной машины» 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 [13].

Таким образом, оптические свойства источников каталога «РадиоАстрон» заметным образом отличаются от средних характеристик объектов полной выборки в радиодиапазоне. А часть из 25 % не отождествленных радиоисточников могут представлять собой сильно удаленные объекты с пылевыми коконами, препятствующими их выделению в оптическом диапазоне 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 слабее 21^m в оптическом диапазоне.

ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ ВЫБОРКИ 110 РАДИОИСТОЧНИКОВ ИЗ КАТАЛОГА «РАДИОАСТРОН» НА ЧАСТОТАХ 22 И 36 ГГц

В 2005 г. были выполнены измерения плотности потоков радиоисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36 ГГц. Наблюдения проводились с помощью 22-м радиотелескопа РТ-22 в соответствии с кооперативной программой исследований России и Украины по космическому проекту «РадиоАстрон». На первом этапе были выполнены наблюдения 110 радиоисточника из предварительного списка «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 [5]. Для измерений на частоте 36 ГГц использовался супергетеродинный радиометр с вырожденным параметрическим усилителем на входе, созданный в ИКИ РАН и описанный в работе [6]. Применялась модуляция (переключение) диаграммы направленности антенны между двумя направлениями, разнесенными по азимуту. Поглощение в атмосфере Земли определялось с использованием метода приема излучения атмосферы на различных углах места антенны (метод «разрезов» атмосферы). Перед

измерением интенсивности излучения определялось положение источника сканированием. Для слабых объектов, не выделяемых с необходимой достоверностью при сканировании по источнику, использовались поправки положения антенны, полученные по близкому и более сильному радиоисточнику. Затем радиотелескоп устанавливался на источник поочередно главным и опорным (условно) лепестками диаграмм направленности, формирующимися при диаграммной модуляции и имеющими взаимно ортогональные поляризации. Антенная температура от источника определялась как разность между усредненными в течение 30 с откликами радиометра в двух различных положениях антенны. В зависимости от интенсивности излучения источников проводились серии из 6—30 измерений, после чего рассчитывалось среднее значение сигнала и оценивалась средняя квадратичная ошибка среднего. Ортогональная поляризация лепестков позволяла измерять полную интенсивность излучения от источника независимо от поляризации этого излучения.

Сбор данных, их архивирование и первичная обработка результатов наблюдений осуществлялась в режиме реального времени, что позволяло вносить оперативную коррекцию в наблюдательный процесс. Программа визуализации наблюдений и первичной обработки обеспечивала необходимый контроль за работой приемной и вычислительной аппаратуры и качеством получаемых данных. В случае, когда позволяли погодные условия, наблюдения на каждой частоте проводились в течение суток. Быстрая смена частоты наблюдения обеспечивала получение практически мгновенных спектров исследуемых объектов.

Калибровка потоков от исследуемых объектов проводилась по данным измерений калибровочных источников 3C123, 3C274, DR21, NGC7027 и планет Юпитера и Сатурна. При пересчете антенных температур в плотности потоков учитывалась зависимость эффективной площади антенны $A_{эф}$ от угла высоты h . Ошибка учета изменений $A_{эф}$, т. е. разброс точек относительно аппроксимирующей кривой, составляла в среднем около 2.5 %. Ошибки, связанные с температурной калибровкой и учетом поглощения в атмосфере, в совокупности составляли около 10 % и учитывались в вычислении потоков источников.

В таблице приведены значения потоков F источников на частотах 22 и 36 ГГц, ошибки σ измерения потоков, спектральные индексы α ($F \propto \nu^\alpha$). Среднее значение спектрального индекса для всех источников оказалось равным $\hat{\alpha} = -0.01$. 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 имело бы более отрицательное значение в силу его зависимости от потока. Благодаря методике отбора источников в каталоге «РадиоАстрон» оказалось больше источников с инвертированными спектрами, чем в полной выборке при данном значении среднего потока.

Наличие в исследованном 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 объектов 0316+413, 1226+023, 1334-127, 1611+343 и ряде других. Именно частотный диапазон 20—40 ГГц является переходным от радио- к субмиллиметрового и далее к оптическому. И если спектр интерполируется единой зависимостью, что мы и наблюдаем в перечисленных источниках, то наблюдаемое уменьшение плотности потока представляется естественным,

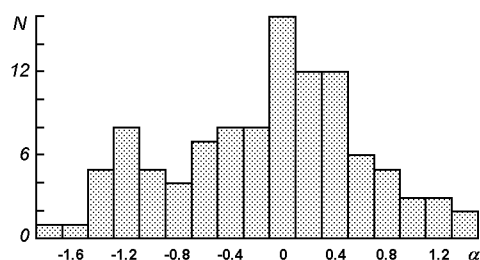
Плотности потоков радиоисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон»
на частотах 22 ГГц и 36 ГГц

№ п/п	Название источника в системе PKS	α	FLUX	SIGM	FLUX	SIGM
		22–36 ГГц	Ю 22 ГГц	(Jy)	Ю 36 ГГц	(Jy)
1	0035+413	-0.12	0.70	0.17	0.66	0.15
2	0057+678	-1.57	0.63	0.11	0.29	0.07
3	0059+581	1.40	0.75	0.12	1.50	0.17
4	0106+013	1.60	0.92	0.11	2.02	0.23
5	0106+130	1.04	0.79	0.10	1.32	0.15
6	0119+115	-0.58	1.04	0.13	0.78	0.09
7	0119+247	2.42	0.40	0.07	1.32	0.25
8	0119+615	-1.08	0.41	0.08	0.24	0.08
9	0123+257	-1.40	0.60	0.10	0.30	0.10
10	0133+476	-0.02	3.04	0.31	3.01	0.32
11	0146+056	0.37	0.98	0.21	1.18	0.19
12	0149+218	0.97	0.94	0.13	0.97	0.20
13	0202+149	0.26	0.51	0.12	0.58	0.11
14	0212+735	0.02	1.04	0.14	1.05	0.12
15	0221+067	0.63	0.57	0.11	0.78	0.26
16	0234+285	0.53	3.49	0.36	4.54	0.46
17	0422+004	0.62	1.49	0.14	2.02	0.25
18	0430+052	0.32	1.80	0.20	2.11	0.40
19	0440+345	-0.77	0.38	0.11	0.26	0.05
20	0528+134	0.38	2.18	0.23	2.63	0.28
21	0537+358	-1.29	0.85	0.15	0.45	0.09
22	0602+673	0.12	1.01	0.20	1.07	0.13
23	0642+449	-0.02	2.46	0.27	2.43	0.27
24	0735+178	0.02	0.91	0.17	0.92	0.15
25	0738+313	0.02	1.16	0.18	1.17	0.15
26	0742+103	-0.11	1.13	0.14	1.07	0.15
27	0748+126	-1.5	2.60	0.29	1.24	0.18
28	0851+202	1.15	2.02	0.27	3.56	0.39
29	0906+015	-0.11	2.38	0.27	2.26	0.30
30	0923+392	-0.39	7.04	0.86	5.80	0.61
31	0945+408	0.36	1.03	0.18	1.23	0.15
32	1049+215	-1.16	0.87	0.14	0.49	0.16
33	1055+018	0.35	4.26	0.44	5.05	0.59
34	1059+282	0.49	0.44	0.12	0.56	0.10
35	1116+128	-1.34	0.97	0.15	0.50	0.20
36	1123+264	0.82	0.46	0.17	0.69	0.15
37	1128+385	0.96	0.76	0.16	1.22	0.13
38	1147+245	-0.20	0.42	0.18	0.38	0.14
39	1155+169	-0.18	0.47	0.17	0.43	0.10
40	1215+303	0.04	0.46	0.18	0.47	0.15
41	1222+216	0.51	0.56	0.12	0.72	0.17
42	1226+023	0.04	17.86	1.81	18.24	1.83
43	1236+077	1.06	0.61	0.16	1.03	0.22
44	1308+326	0.43	1.83	0.19	2.26	0.28
45	1308+327	-0.93	0.54	0.13	0.34	0.09
46	1354+195	0.33	1.57	0.21	1.85	0.25
47	1413+135	0.23	0.50	0.12	0.56	0.12
48	1417+385	1.29	0.63	0.16	1.19	0.13
49	1444+175	-1.12	0.85	0.15	0.49	0.11
50	1502+106	0.21	0.46	0.09	0.51	0.08
51	1514+197	2.01	0.50	0.12	1.35	0.20
52	1538+149	0.53	0.61	0.14	0.79	0.15
53	1546+027	-1.32	4.31	0.45	2.25	0.23
54	1547+507	-0.29	1.06	0.18	0.92	0.11
55	1548+056	-0.54	2.66	0.32	2.04	0.22
56	1551+130	-1.12	0.78	0.14	0.45	0.14
57	1600+335	0.23	0.66	0.17	0.74	0.15
58	1606+106	-0.09	0.94	0.14	0.90	0.11
59	1611+343	-1.00	6.02	0.62	3.67	0.40
60	1633+382	0.16	3.65	0.39	3.94	0.42
61	1636+473	0.60	1.13	0.14	1.52	0.30
62	1652+398	-0.41	1.64	0.18	1.34	0.17
63	1655+077	-0.78	1.92	0.23	1.31	0.21
64	1656+477	0.20	0.57	0.18	0.63	0.17
65	1656+482	-0.41	1.04	0.18	0.85	0.18
66	1732+389	0.25	1.37	0.20	1.55	0.31
67	1734+063	-0.62	0.87	0.13	0.64	0.13

Окончание табл.

№ п/п	Название источника в системе PKS	α		FLUX		SIGM	
		22–36 ГГц	22–36 ГГц	22 ГГц	36 ГГц	(Jy)	(Jy)
68	1734+508	-1.10	0.55	0.14	0.32	0.14	0.09
69	1738+476	0.09	0.88	0.14	0.92	0.14	0.24
70	1749+096	0.30	2.91	0.30	3.37	0.30	0.34
71	1758+666	0.65	0.96	0.16	1.32	0.16	0.18
72	1800+440	0.37	0.86	0.15	1.03	0.15	0.24
73	1807+698	-1.22	2.50	0.26	1.37	0.26	0.25
74	1823+568	-1.88	2.78	0.28	1.10	0.28	0.18
75	1842+681	-0.40	1.43	0.19	1.17	0.19	0.18
76	1848+283	0.41	0.71	0.14	0.87	0.14	0.19
77	1849+005	-1.16	0.92	0.13	0.52	0.13	0.12
78	1849+670	0.66	0.78	0.16	1.08	0.16	0.12
79	1923+210	0.36	1.07	0.19	1.28	0.19	0.15
80	1947+267	-0.82	1.74	0.25	1.16	0.25	0.20
81	1954+513	0.15	0.38	0.12	0.41	0.12	0.13
82	2023+335	0.45	1.20	0.18	1.50	0.18	0.25
83	2029+121	-0.45	0.45	0.14	0.36	0.14	0.11
84	2050+364	-1.24	0.59	0.10	0.32	0.10	0.12
85	2059+034	-1.35	1.52	0.19	0.78	0.19	0.23
86	2107+353	0.72	0.78	0.11	1.11	0.11	0.19
87	2121+053	-1.06	2.71	0.28	1.61	0.28	0.19
88	2134+004	-0.63	4.25	0.43	3.12	0.43	0.35
89	2136+141	0.82	1.39	0.21	2.08	0.21	0.22
90	2145+067	-0.21	9.87	1.00	8.90	1.00	0.91
91	2200+420	0.36	5.54	0.57	6.62	0.57	0.69
92	2201+171	-0.05	1.22	0.15	1.19	0.15	0.14
93	2201+315	0.09	2.45	0.26	2.56	0.26	0.39
94	2223+210	-0.43	0.94	0.14	0.76	0.14	0.18
95	2229+591	-0.09	0.45	0.12	0.43	0.12	0.09
96	2229+693	0.06	0.62	0.12	0.64	0.12	0.11
97	2230+114	1.56	3.11	0.34	6.70	0.34	0.69
98	2234+282	1.26	0.79	0.16	1.47	0.16	0.16
99	2247+596	-1.26	1.36	0.17	0.73	0.17	0.15
100	2251+134	0.68	0.60	0.14	0.84	0.14	0.14
101	2251+158	1.48	7.61	0.79	15.76	0.79	1.59
102	2253+417	0.31	0.43	0.13	0.50	0.13	0.14
103	2254+074	-1.07	0.49	0.13	0.29	0.13	0.09
104	2301+060	0.00	0.42	0.12	0.42	0.12	0.06
105	2303+599	-0.56	1.67	0.21	1.27	0.21	0.18
106	2320+506	0.71	0.64	0.11	0.91	0.11	0.14
107	2325+093	-0.62	1.43	0.23	1.05	0.23	0.13
108	2331+072	-0.23	1.23	0.15	1.10	0.15	0.14
109	2344+092	-0.24	1.05	0.15	0.93	0.15	0.29
110	2350+602	-0.50	0.46	0.09	0.36	0.09	0.12

Рис. 3. Распределение количества N источников по значению спектрально-го индекса α



как и полученный нами результат по среднему спектральному индексу источников наблюдавшейся выборки.

На рис. 3 приведена гистограмма распределения спектральных индексов измеренной выборки источников. Как и следовало ожидать, полученное распределение соответствует распределению спектральных индексов радиоисточников каталога WMAP, где также среднее значение спектрального индекса α близко к нулю.

ВЫВОДЫ

1. На основе данных обзоров неба на частотах 15 ГГц и ниже построена экстраполированная зависимость количества источников $\lg N - \lg S$ для частоты 22 ГГц — максимальной частоты наблюдений в космическом эксперименте «РадиоАстрон».

2. Используя полученную зависимость числа источников с инвертированными спектрами от потока оценено количество объектов с инвертированными спектрами в предварительном каталоге «РадиоАстрон».

3. Сравнены оптические характеристики радиоисточников каталога «РадиоАстрон» и источников полной выборки из обзора 87 GB.

4. Выполнены наблюдения 110 радиоисточников из предварительного каталога «РадиоАстрон» на частотах 22 и 36 ГГц, определены их потоки и спектральные индексы.

5. Получено значение среднего спектрального индекса выборки из 110 источников и построена гистограмма распределения спектральных индексов. Несмотря на существенно более низкий уровень потоков в исследуемой нами выборке, среднее значение спектрального индекса оказалось близким к нулю, как и для более сильных источников обзора WMAP.

Авторы благодарны персоналу РТ-22 за помощь в проведении наблюдений. Работа частично поддержана грантом INTAS IA 03-59-11.

1. Амирханян В. Р., Гориков А. Г., Ларионов М. Г. и др. Каталог радиоисточников Зеленчукского обзора неба в диапазоне склонений $0^\circ-14^\circ$. — М.: Изд-во Москов. гос. ун-та, 1989.—53 с.
2. Амирханян В. Р., Гориков А. Г., Капусткин А. А. и др. Обзор небесной сферы на частотах 8.7 и 14.4 ГГц // Астрон. журн.—1981.—58, вып. 4.—С. 717—724.
3. Кардашев Н. С. // Сообщ. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга.—2004.—отд. вып.—С. 1—27.
4. Ларионов М. Г. Зеленчукский обзор неба в диапазоне склонений $0^\circ-14^\circ$. Дополнительный список радиоисточников // Сообщ. Спец. астрофиз. обсерватории.—1992.—С. 9—48.
5. Моисеев И. Г., Нестеров Н. С. Калибровочные радиоисточники в миллиметровом диапазоне волн // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1985.—73.—С. 189—197.
6. Струков И. А., Скулачев Д. П. Исследование анизотропии фонового излучения с борта ИСЗ. Эксперимент Реликт // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.—1986.—31.—С. 37—72.
7. Becker R. H., White R. L., Helfand D. J. The FIRST survey: Faint images of the radio sky at twenty centimeters // *Astrophys. J.*—1995.—450, N 9.—P. 559—577.
8. Bennett C., Hill R. S., Hinshaw G., et al. First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Foreground emission // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2003.—148, N 9.—P. 97—117.
9. Cleary K. A., Taylor A. C., Waldram E., et al. Source subtraction for the extended Very Small Array and 33-GHz source count estimates // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—360, N 1.—P. 340—353.
10. Cotton W. D., Condon J. J., Yin Q. F., et al. The NRAO VLA D-array sky survey // *Extragalactic radio sources: proceedings of the 175th Symposium of the International Astronomical Union, held in Bologna, Italy, 10—14 October 1995* / Eds R. D. Ekers, C. Fanti, L. Padrielli. — Dordrecht: Kluwer, 1995.—P. 503—504.
11. Douglas J. N., Bash F. N., Bozyan F. A., et al. The Texas survey of radio sources covering $-35.5^\circ < \delta < 71.5^\circ$ at 365 MHz // *Astron. J.*—1996.—111, N 5.—P. 1945—1963.
12. Gregory P. C., Scott W. K., Douglas K., Condon J. J. The GB6 Catalog of Radio Sources // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1996.—103, N 4.—P. 427—432.
13. Knudsen K. K., van der Werf P., Franx M., et al. Submillimeter observations of Distant Red Galaxies: uncovering the 1 mJy 850 μ m-population // *Astrophys. J.*—2005.—632, N 1.—P. L9—L12.
14. Lawrence C. R., Bennett C. L., Hewitt J. N., et al. 5 GHz radio structure and optical identifications of sources from the MG survey. II. Maps and finding charts // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1986.—61, N 5.—P. 105—157.
15. Liu F. K., Xue-Bing Wu. Black hole mass and binary model for BL Lac object OJ 287 // *Astron. and Astrophys.*—2002.—388, N 6.—P. L48—L52.

16. *Lobanov A. P.* Mergers and binary systems of SMBH in the contexts of nuclear activity and galaxy evolution // Proc. of the Conf. "Growing Black Holes", Garching, Germany June 21—25, 2004 / Eds A. Merloni, S. Nayakshin, R. Sunyaev. — Berlin: Springer—Verlag, 2004.—P. 354—355.—(Series of "ESO Astrophysics Symposia").
17. *Myers S. T., Contaldi C. R., Bond J. R., et al.* A fast gridded method for the estimation of the power spectrum of the cosmic microwave background from interferometer data with application to the cosmic background imager // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 2.—P. 575—598.
18. *Raiteri C. M., Villata M., Tosti G., et al.* Optical and radio behaviour of the BL Lacertae object 0716+714 // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**402**, N 4.—P. 151—170.
19. *Taylor A. C., Grainge K., Jones M. E., et al.* The radio source counts at 15 GHz and their implications for cm-wave CMB imaging // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—**327**, N 1.—P. L1—L4.
20. *Valtaoja E., Haarala S., Lento H., et al.* Five years monitoring of extragalactic radio sources // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**203**, N 9.—P. 1—20.
21. *Waldram E. M., Pooley G. G., K. J. B. Grainge, et al.* 9C: A survey of radio sources at 15 GHz with the Ryle Telescope // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**342**, N 7.—P. 915—925.

Поступила в редакцию 28.03.06