

УДК 524.7-873

РТ-22 КраО: от Симеизского поискового обзора неба до выборки источников для полетной программы “РадиоАстрон”

А.Е. Вольвач¹, М.Г. Ларионов²

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

² АКЦ Физического института им. П.Н.Лебедева, Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 октября 2008 г.

Ключевые слова: радиоисточники, радиоинтерферометрия

1 Введение

Поисковые обзоры радиоисточников являются первоисточниками информации, на основе которой осуществляются дальнейшие исследования астрофизических объектов, излучающих в радиодиапазоне.

До 1960-х годов радиоастрономическая практика ограничивалась проведением обзоров на метровых волнах. Это объяснялось возможностями радиотехнических средств, используемых для проведения экспериментов. Спектральные наблюдения проводились в узком диапазоне длин волн и ограничивали развитие астрофизической интерпретации полученных в обзорах данных. Первые дециметровые поисковые обзоры принесли важную информацию о спектральных характеристиках радиоисточников, когда были обнаружены объекты, имеющие максимумы спектральной плотности излучения в дециметровом диапазоне длин волн. Стало ясно, что могут существовать радиоисточники, основная часть излучения которых может быть сосредоточена на сантиметровых волнах. Такие источники должны быть компактными и давать высокое энерговыделение в сравнении с объектами, выделяемыми на метровых волнах.

Другим принципиальным моментом было открытие в это время явления переменности радиоисточников Шоломицким (1965), которое произошло в процессе наблюдений на дециметровых волнах источника СТА 102. Открытие переменности в радиодиапазоне значительно повысило информативность астрофизических исследований и стимулировало проведение поисковых обзоров неба, в том числе в плане продвижения частоты обзоров в коротковолновую область.

По мере продвижения в сторону коротких длин волн мы видим излучение от все более компактных источников, связанное с центральными областями астрофизических объектов, изучение которых составляет фундаментальную научную задачу. С этими областями связан также и феномен переменности излучения, представляющий загадку для исследователей и по сей день.

2 Симеизский поисковый обзор неба “S” на длине волны 3 см с помощью РТ-22 КрАО

Более 40 лет назад в 1966 г. были начаты работы по подготовке и созданию аппаратурно-программных средств для проведения первого в СССР поискового обзора неба на длине волны 3 см с помощью РТ-22 КрАО. В кооперации по реализации программы обзора участвовало три организации: Крымская астрофизическая обсерватория, ГАИШ МГУ и МГПИ им. Ленина.

Учитывая важность перечисленных проблем для астрофизики, в 1966 г. академик Н.С. Кардашев сформулировал радиоастрономическую задачу о проведении обзора северной небесной полусферы в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн. Переход не просто к сантиметровому диапазону длин волн, а к коротковолновой его части, вселял надежду на обнаружение новых радиоисточников, имеющих характерные подъемы в спектрах излучения в сантиметровой области. Не исключалось также, что удастся найти новый класс астрофизических объектов, не проявляющий себя на метровых длинах волн и принадлежащий либо нашей Галактике, либо имеющий метагалактическую природу.

К началу проведения первого пробного обзора неба у нас в стране уже было известно около 30 публикаций по обзорам небесной сферы на длинах волн метрового и дециметрового диапазонов. Результаты и выводы, полученные из анализов этих обзоров, послужили основой системы взглядов относительно морфологии Галактики и Метагалактики, строения и динамики астрофизических объектов. Был подведен итог открытиям, приведшим к установлению существующих типов источников: радиогалактик, нормальных галактик, квазаров (QSO), сейфертовских и компактных галактик, галактических объектов. Немалый вклад в экспериментальном плане в это внесли наши радиоастрономы: Кардашев Н.С., Парийский Ю.Н., Шоломицкий Г.Б., Курильчик В.Н., Матвеев Л.И., Брауде С.Я., Сороченко Р.Л., Кузьмин А.Д. и др. Работы этих исследователей во многих случаях явились основополагающими при обнаружении явлений, послуживших основой для дальнейших астрофизических работ по установлению физической природы источников радиоизлучения.

В те годы не было известно о радиоизлучении источников, связанных со звездными образованиями, или какими либо другими структурами. Впервые был поставлен вопрос о галактической популяции высокоширотных радиоисточников. И постановка этой задачи была напрямую связана с первым Симеизским обзором неба “S” и последовавшими за этим статистическими исследованиями этой популяции радиоисточников (Ларионов, Горшков, Попов, Моисеев, 1971а). Даже в более поздние времена, когда было обнаружено радиоизлучение от звездных объектов (HR 1099, Лебедь XI, SS 433, GRS 1915+105 и др.) считалось, что этой категорией радиоизлучающих источников можно пренебречь в космологических и статистических исследованиях.

В плане проведения обзора на коротких сантиметровых длинах волн вопрос галактических радиоисточников представлял интерес и с точки зрения получения новых данных о галактической среде, где могли располагаться компактные образования, морфологически связанные с областями звездообразования, фронтами ударных волн и структурой III районов. В высокочастотной части сантиметрового диапазона длин волн в высоких галактических широтах эмиссионная способность теплового излучения ничтожна. Поэтому об измеримых характеристиках среды можно было говорить только, если наблюдения выполнялись в плоскости Галактики, да и то только в направлениях, близких к центру, где яркостные температуры доходили до 0.1°K . Если на низких частотах мы наблюдали протяженные тепловые образования, то на коротких длинах волн картина несколько изменяется. Мы начинаем видеть набор компактных образований, вкрапленных в области ионизованного водорода. Детали с низким контрастом по яркостной температуре выпадают из поля зрения, и Галактика становится прозрачной на этих волнах. Так, к примеру, оптическая толща в высоких широтах становится порядка 10^{-6} , что соответствует яркостным температурам в единицы мК.

Несмотря на такие низкие яркостные температуры, вопрос анализа данных обзоров очень важен для внесения коррекции за галактическое излучение при тонких экспериментах по реликтовому фону. Это относится не только к фоновому излучению Галактики, но и к совокупному излучению радиоисточников в диаграмме направленности антенны.

Таким образом, к началу проведения сантиметрового Симеизского обзора неба “S” было ясно, что этот диапазон длин волн представляет значительный интерес с точки зрения получения данных о новых радиоисточниках, обнаруживающих интересные в астрофизическом плане характеристики излучения. Прогнозировалось, что их относительная доля в общем списке с уменьшением длины волны обзора должна расти. Повышенное внимание к таким объектам объяснялось как их космологической значимостью, так и высокой информативностью, которую несли в себе данные о переменности этих образований.

Следует заметить, что уровень аппаратурного обеспечения подобных экспериментов в стране в то время был очень низким. Мы отдавали себе отчет, что придется потратить годы, прежде чем удастся выполнить первые наблюдения по заявленной теме. Особое беспокойство вызывало полное отсутствие систем сбора информации и обработки данных с помощью ЭВМ. И если мы располагали некоторым опытом проведения радиоастрономических исследований на радиотелескопах, то опыта создания новой аппаратуры у нас не было. Предстояло преодолеть отставание в этой области по сравнению с уровнем зарубежных экспериментов фактически на два поколения аппаратуры.

Информация с радиотелескопов в то время записывалась на бумажные носители (перфоленты, самописцы). Было принято решение для обзора на длине волны 3 см создать комплекс приемной регистрирующей аппаратуры и аппаратуры автоматической обработки данных. Учитывая очень большие объемы информации, поступающие при выполнении обзора на коротких длинах волн, необходимо было регистрировать данные на магнитные носители. Такими носителями могли служить лишь многорожечные магнитофоны с широкой магнитной лентой, которые необходимо было приобрести и приспособить для задач автономной регистрации данных поискового обзора (Ларионов, Капусткин, 1971б).

К 1969 г. весь комплекс аппаратуры и программных средств был готов для проведения быстрого поискового обзора неба на длине волны 3 см. Кроме того, была проведена модернизация радиотелескопа РТ-22 КрАО под указанную задачу (Ларионов, Капусткин, Моисеев, 1973а). В течение апреля 1969 г. было проведено два сеанса наблюдений и зарегистрированы на магнитные ленты данные о половине северной небесной сферы. Это был пробный поисковый обзор неба на столь короткой длине волны. Не был ясен состав популяции объектов на этих волнах, поэтому задачей обзора было нахождение всех объектов на небе с плотностью потока более (1–2) Ян. По уровню потока обнаруживаемых источников он был эквивалентен современному обзору WMAP, но выполнялся тогда, когда радиоастрономия находилась еще в юном возрасте.

Информацию поискового обзора неба предполагалось обрабатывать с помощью ЭВМ, которые не имели каналов связи с нестандартными носителями на магнитной ленте. Использование ЭВМ типа БЭСМ-4 на телескопе РТ-22 КрАО было нереально как по причине отсутствия в них каналов ввода данных положения антенны, звездного времени, наблюдательных массивов и другой служебной информации, так и по причине их большого объема и дороговизны. Было удобнее записывать информацию на переносном нестандартном магнитофоне на месте проведения эксперимента и перевозить магнитную ленту для ввода в ЭВМ также с нестандартного накопителя на магнитной ленте. Для этого в ЭВМ НАИРИ-2 был создан канал ввода с накопителя на магнитной ленте (Ларионов, Никаноров, Попов, 1973б).

В (1969–1970) гг. была выполнена обработка данных обзора и получен предварительный каталог источников, который в дальнейшем уточнялся на РТ-22 КрАО (Ларионов, 1971а). К результатам обзора следует отнести обнаружение нескольких новых радиоисточников, среди которых самым ярким и выдающимся был объект по каталогу Симеиз – *S0528+13*, получивший

персональное имя “*Nimfa*” (Ларионов, Попов, Горшков, 1970). Это был первый блазар, обнаруженный в обзоре в нашей стране. Он встал в один ряд с известным блазаром ОJ 287, обнаруженным в те же годы при проведении обзора в Огайской обсерватории. Учитывая значительное красное смещение объекта (более 2) и тот факт, что основное излучение от него сосредоточено в γ -диапазоне, можно утверждать, что *S0528+13* является одним из самых мощных излучателей во Вселенной. Имея малые угловые размеры и высокую долю коррелированного потока, он активно используется как калибратор для интерферометрических наблюдений. Радиоисточник *S0528+13* является ярчайшим представителем активных ядер галактик. В активной и пассивной фазах потоки от него могут отличаться почти в десять раз. По-видимому, это связано с активностью двойной сверхмассивной черной дыры в центральной области хозяйской галактики. Многие десятилетия этот источник активно исследуется на многих обсерваториях Мира.

В первом сантиметровом обзоре удалось обнаружить ряд менее ярких новых источников. Но одним из важных достижений обзора явилось обнаружение нового класса сильно переменных объектов. Эти объекты позднее попали в поле зрения большой антенны Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO), когда там проводили известные поисковые обзоры неба на длине волны 6 см. Потоки этих источников изменялись в 10 и более раз. Такие источники также были обнаружены и в галактической популяции источников, часть из которых попала в разряд микроквazarов.

Анализ распределения радиоисточников Симеизского обзора “S”, а также выборки Стулла из Огайского списка позволили впервые поставить вопрос о существовании высокоширотной галактической популяции радиоисточников, связанных с тонкоструктурными деталями фонового излучения Галактики (1975а, 1975б, 1975в).

В работе Ларионова (1975б) была исследована видимая связь дискретных радиоисточников Симеизского обзора “S” с тонкоструктурными деталями (“гребнями”) распределенного радиоизлучения Галактики в областях “Петля II” в диапазоне прямых восхождений $20^{\text{h}} < \alpha < 24^{\text{h}}$ и склонений $0^{\circ} < \delta < 30^{\circ}$. Использовалась выборка радиоисточников обзора “S” (Ларионов и др., 1971а). Из 28 радиоисточников, находящихся в этой зоне, 22 источника ассоциировались со структурными деталями распределенного излучения Галактики в пределах $\pm 1^{\circ}$ от положений максимумов “гребней”, что соответствовало удвоенной неопределенности положения “гребней”. Площадь, занимаемая “гребнями” с учетом удвоенных ошибок, их положения и координат источников, составляет 50 % площади рассматриваемой зоны. Вероятность нахождения 22 источников из 28 в области, прилегающей к “гребням”, равна $3 \cdot 10^{-3}$. Отсюда следовало, что около 20 % радиоисточников обзора “S” в указанной зоне могут быть связаны с системой узких протяженных максимумов галактического радиоизлучения и, следовательно, иметь галактическую природу. Структурные галактические образования распределены неравномерно во всей зоне обзора “S”, поэтому средний процент объектов, имеющих галактическое происхождение, естественно, ниже. Позднее, на более обширном в статистическом плане материале Огайского обзора неба, эти результаты были подтверждены с более высокой достоверностью (1978).

Другим важным выводом является заключение о том, что ряд новых объектов Симеизского обзора “S” имеет очень широкий диапазон переменности на сантиметровых длинах волн (десятки раз). Не исключена связь именно этих радиоисточников с узкими “гребнями” распределенного излучения Галактики.

Пионерский поисковый обзор, выполненный с помощью РТ-22 НИИ “КраО”, дал старт серии обзоров, позднее выполненных на радиотелескопе РАТАН-600, где они стали крупнейшими в Мира сантиметровыми обзорами неба на момент их публикации (Ларионов, Попов, 1976). Лишь спустя 6 лет появились известные обзоры, выполненные в NRAO и являющиеся базовыми обзорами сантиметрового диапазона длин волн до настоящего времени.

3 Выборка источников для полетной программы “РадиоАстрон”

Одной из главных астрофизических загадок остается физическая природа механизма энерговыделения “центральной машины”, скрытой в ядерных областях активных галактических и внегалактических объектов. Наземно-космическая научная программа “РадиоАстрон” предусматривает проведение исследования морфологии и динамики околоядерных областей источников, где происходит указанное мощное энерговыделение.

В соответствии с научной кооперацией между Россией и Украиной эта работа проводится с использованием 22-м радиотелескопа миллиметрового диапазона длин волн РТ-22 НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”. Программой исследований предусмотрено проведение работ с высокочувствительными радиометрами на частоты 22 ГГц и 36 ГГц. Это позволит получить спектральные характеристики источников вблизи частоты 22 ГГц – основной частоте эксперимента “РадиоАстрон”. Для реализации проекта подготавливается научная программа, существенной частью которой является исследование компактных образований в центральных областях внегалактических источников.

3.1 Формирование каталога “РадиоАстрон”

В рамках подготовки научной программы проекта был составлен предварительный каталог 1250 радиоисточников, имеющих избытки плотности потока на высоких частотах (Вольвач, Кардашев, Ларионов, 2004). Это – так называемые объекты с инвертированными спектрами излучения, где спектральная плотность потока растет в сторону коротких длин волн. Именно 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 в два этапа: 1) составление предварительного списка объектов по данным существующих каталогов и наблюдений отдельных источников; 2) уточнение спектральных характеристик источников предварительного каталога на частотах выше 10 ГГц с использованием наблюдательных программ на РТ-22 НИИ “КрАО”.

3.2 Измерения потоков выборки радиоисточников из каталога “РадиоАстрон” на частотах 22 ГГц и 36 ГГц

Измерения плотности потоков радиоисточников из предварительного каталога “РадиоАстрон” были выполнены на частотах 22 ГГц и 36 ГГц с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-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.

3.3 Построение статистических зависимостей “logN-LogS” и “число источников с инвертированными спектрами – поток”

Для количественной оценки полноты 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 (“logN-logS”) (Вольвач и др., 2007). 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 и их спектральные характеристики, можно было определить долю источников с инвертированными спектрами и их угловую плотность в зависимости от потока на частоте 22 ГГц.

Располагая зависимостью “logN-logS” и числом 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 (предполагаемый минимальный уровень потока источников в полетном списке программы “РадиоАстрон”).

Результаты вычислений с использованием указанных зависимостей приводят к следующим выводам. На основе полученной зависимости “logN-logS” для частоты 22 ГГц можно получить число источников на стерадиан с потоками $S \geq 0,25$ Ян ($N_{S \geq 0,25} = 290$). Здесь выполнена нормировка для угловой плотности источников: $N(S > 1 \text{ Ян}) = 40$. Для северного неба (6.28 стер.) мы будем иметь около 1860 источников с потоками более 0.25 Ян. На основе зависимости “число источников с инвертированными спектрами – поток” можно ожидать наличия в общем списке источников около 1/3 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 проведении наблюдений по определению спектральных характеристик вблизи частоты 22 ГГц и удалены из списка объектов, включенных в полетную программу “РадиоАстрон”.

3.4 Сравнение оптических и радио 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° – 20° , общая с исследовавшимися радиоисточниками обзор 87 GB. Полнота последнего колеблется на уровне 50–100 мЯн, что несколько 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 отождествленных 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. Это вполне естественно, так как в подавляющем большинстве – это активные ядра галактик.

Также количество отождествленных галактик оказалось в 6 раз меньше по сравнению со звездными объектами. Отсутствуют источники, имеющие структуру – все объекты в оптическом диапазоне имеют субсекундные размеры, что определяется в основном разрешением оптического телескопа. 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 машины” в космологически удаленных источниках активные процессы звездообразования в окологерных 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, т. к. рост скорости звездообразования напрямую связан с увеличением красного смещения источников.

Т. о., оптические свойства источников каталога “РадиоАстрон” заметным образом отличаются от средних характеристик объектов полной выборки в радиодиапазоне. А часть из 25 % неотожествленных радиоисточников может 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 .

4 Заключение

Перечисленные работы свидетельствуют о том, что радиотелескоп РТ-22 остается и по сей день ведущим инструментом миллиметрового диапазона длин волн, на котором проводятся фундаментальные исследования переменности потока активных ядер галактик и исследования механизмов генерации энергии, приводящих к возникновению мощных маяков во Вселенной – блазаров, в ядрах которых обнаруживают свою активность сверхмассивные черные дыры.

Литература

- Вольвач А.Е., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. // Труды ГАИШ МГУ. 2004. Т. 75. С. 184.
Вольвач А.Е., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г., Вольвач Л.Н., Стрепка И.Д. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2007. Т. 23. №. 3. С. 174.
Ларионов М.Г., Горшков А.Г., Попов М.В. // Астрон. цирк. 1970. №. 590. С. 3.
Ларионов М.Г., Горшков А.Г., Попов М.В., Моисеев И.Г. // Астрон. цирк. 1971а. №. 665. С. 1.
Ларионов М.Г., Капусткин А.А. // Сообщения ГАИШ. 1971б. №. 173. С. 29.
Ларионов М.Г., Капусткин А.А., Моисеев И.Г. // Известия КрАО. 1973а. Т. 67. С. 206.
Ларионов М.Г., Никаноров А.С., Попов М.В. // Известия КрАО. 1973б. Т. 67. С. 213.
Ларионов М.Г. // Астрон. цирк. 1975а. №. 882. С. 1.
Ларионов М.Г. // Астрон. цирк. 1975б. №. 884. С. 1.
Горшков А.Г., Ларионов М.Г., Попов М.В. // Письма в Астрон. журн. 1975в. Т. 1. №. 882. С. 1.
Ларионов М.Г., Сидоренков В.Н. // Астрон. журн. 1978. №. 2. С. 299.
Амирханян В.Р., Горшков А.Г., Ларионов М.Г. и др. // Отдельный сборник. М.: МГУ. 1989.
Шоломицкий Г.Б. // Information Bullitin on variable stars. 1965. V. 83. P. 1.