

АНАЛИЗ КАНДИДАТОВ В ГИГАНТСКИЕ РАДИОИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ МНОГОВОЛНОВЫХ ДАННЫХ

ANALYSIS OF GIANT RADIO SOURCE CANDIDATES BASED ON MULTIWAVELENGTH DATA

О.П. Желенкова

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Нижний Архыз, Россия, zhe@sao.ru

М.В. Хоруженко

Южный федеральный университет,
Ростов-на-Дону, Россия, milenka_khoruzhenko@mail.ru

O.P. Zhelenkova

Special Astrophysical Observatory RAS,
Nizhnij Arkhyz, Russia, zhe@sao.ru

M.V. Khoruzhenko

South Federal University,
Rostov-on-Don, Russia, milenka_khoruzhenko@mail.ru

Аннотация. Каталог NVGRC включает объекты, отобранные с помощью алгоритма распознавания образов из обзора NVSS в качестве кандидатов в гигантские радиоисточники (ГРИ). Мы провели детальное обследование NVGRC-объектов, попавших в интервал прямых восхождений $00^{\text{h}}00^{\text{m}}-05^{\text{h}}20^{\text{m}}$, для подтверждения их принадлежности к ГРИ. Для определения радиоструктуры NVGRC-объектов использовались обзоры GLEAM, TGSS, RACS и VLASS; для идентификации их родительских галактик — оптические и инфракрасные обзоры LS, DES, UKIDSS и WISE; для определения красных смещений — базы данных VizieR, NED и NOAO DataLab. Работу было бы невозможно выполнить без информационных ресурсов и программного обеспечения виртуальной обсерватории. Из 370 обследованных NVGRC-объектов 187 были классифицированы как ГРИ, из них 82 ранее были известны как ГРИ по публикациям. Мы впервые подтвердили принадлежность 105 NVGRC-объектов к ГРИ. Для 98 объектов было установлено, что их компоненты не связаны физически и объединены в один радиоисточник алгоритмом распознавания образов. Мы оценили эффективность примененного алгоритма для селекции ГРИ-кандидатов в каталог NVGRC в $\approx 30\%$.

Ключевые слова: активные ядра галактик, гигантские радиоисточники; астрономические информационные ресурсы.

Abstract. The NVGRC catalog includes objects selected by the pattern recognition algorithm from the NVSS survey as candidates for giant radio sources (GRS). We have studied in detail 370 NVGRC objects falling within the right ascension interval $00^{\text{h}}00^{\text{m}}-05^{\text{h}}20^{\text{m}}$ to confirm their GRS classification. The GLEAM, TGSS, RACS, and VLASS radio surveys were used to determine the radio morphology of the NVGRC objects; the LS, DES, UKIDSS, and WISE optical and infrared surveys, to identify their host galaxies; and the VizieR, NED, and NOAO DataLab databases, to determine their redshifts. This work would not have been possible without the information resources and software of the virtual observatory. Of the 370 NVGRC objects examined, 187 radio sources were classified as GRSs; 82 of them were previously known as GRS from publications. We have confirmed for the first time that 105 NVGRC objects are GRS. For 98 objects it turned out that their components were not physically connected and were merged into one radio source by a pattern recognition algorithm.

We estimated the efficiency of the algorithm, used for selecting GRS candidates for the NVGRC catalog, at $\approx 30\%$.

Keywords: active galactic nuclei, giant radio sources, astronomical information resources.

ВВЕДЕНИЕ

К гигантским относят радиоисточники, линейный проецируемый размер радиоструктуры которых превышает 0.7 Мпк. Самые большие гигантские радиоисточники (ГРИ) имеют размеры порядка 5 Мпк, что сопоставимо с размером скопления галактик. К 2020 г. было открыто порядка 900 ГРИ [Dabhade et al., 2020], и они считались достаточно редкими объектами. В настоящее время их известно более 11.5 тыс. [Oei et al., 2023; Mostert et al., 2024]. Особенно много ГРИ обнаружено в области низкочастотного обзора LoTSS, который отличается высокой чувствитель-

ностью. Обзор LoTSS DR2 охватывает 27 % северного неба в двух основных областях, центры которых расположены примерно на 13^{h} и 01^{h} прямого восхождения. Некоторые наши объекты попали во вторую область обзора, а именно от 00^{h} до $02^{\text{h}}49^{\text{m}}$ по прямому восхождению и от $+16^{\circ}20'$ до $+43^{\circ}11'$ по склонению.

В остальных областях неба уровень их обнаружения остался прежним из-за отсутствия чувствительных низкочастотных обзоров.

Размер ГРИ пытаются объяснить несколькими гипотезами: менее плотной межгалактической средой (МГС) в окрестности источника [Safouris et al.,

2009; Malarecki et al., 2015]; большим возрастом радиоструктуры [Kaiser et al., 1997]; особыми свойствами ядра галактики [Kuźmicz, Jamrozy, 2012].

Гигантские радиоисточники переносят вещество из родительской галактики на большие расстояния и обогащают МГС нетепловыми частицами и магнитными полями [Kronberg, 1994; Oei et al., 2022]. Эта намагниченная плазма может существовать миллиарды лет и служить источником инжекции высокоэнергетических частиц в МГС [Enßlin, Gopal-Krishna, 2001; van Weeren et al., 2010].

Радиодолы ГРИ являются крупнейшими естественными резервуарами магнитного поля и нетепловых релятивистских частиц, связанных с галактической системой, и хранят большую часть энергии, выделяемой черными дырами, в течение длительного времени [Kronberg et al., 2001]. Это делает ГРИ хорошим инструментом для оценки энергии, выделяемой центральными черными дырами. Протяженные доли ГРИ с заряженными частицами достаточно велики, чтобы ускорять частицы до чрезвычайно высоких энергий. Предполагается, что ударные волны в джетах и долях ГРИ могут генерировать космические лучи [Kronberg et al., 2004; Hardcastle et al., 2009].

Плотность МГС довольно низка около некоторых ГРИ [Machalski et al., 2006; Malarecki et al., 2015], хотя никакой связи между ГРИ и пустотами не было обнаружено [Kuźmicz et al., 2018]. Более того, Komberg, Pashchenko [2009] показали, что нет корреляции между размером радиоисточника и плотностью галактик в его окрестностях.

Гигантские радиоисточники размером $>4'$ представляют особый интерес при разделении излучения радиоисточников и микроволнового фона, а также при учете их вклада в угловой спектр мощности, используемый при выборе космологической модели [Solovyov, Verkhodanov, 2014; Verkhodanov et al., 2016]. Для учета вклада ГРИ в микроволновой фон по всей небесной сфере необходимы их дальнейшие систематические поиски.

В нашей работе для поиска ГРИ мы использовали каталог NVGRC [Proctor, 2016]. В каталоге представлен список радиоисточников с угловыми размерами $>4'$, которые являются кандидатами в ГРИ, отобранными из каталога NVSS с помощью алгоритмов распознавания образов. Определения родительских галактик и красных смещений, необходимое для оценки проецируемых линейных размеров объектов каталога NVGRC, в работе [Proctor, 2016] не проводилось.

Мы провели визуальную инспекцию 370 объектов, что составляет четверть источников из каталога NVGRC. Ранее аналогичная работа была выполнена в [Dabhade et al., 2017], где были идентифицированы родительские галактики только для тех радиоисточников, у которых в обзоре VLASS было выявлено радиоядро. В отличие от Dabhade et al. [2017], мы проверяли на принадлежность к ГРИ и те NVGRC-объекты, у которых на картах VLASS ядро не обнаруживается.

В данной работе мы принимаем плоскую космологию Λ CDM, основанную на результатах эксперимента

Planck [Aghanim et al., 2020]: $H_0=67.4$ км с⁻¹ Мпк⁻¹, $\Omega_M=0.315$. Спектральный индекс радиоисточника α определяется как $S_\nu \propto \nu^\alpha$.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ И МЕТОДИКА ИНСПЕКЦИИ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Каталог NVGRC [Proctor, 2016], который мы использовали в своей работе, составлен на основе каталога NVSS [Condon et al., 1998]. Для распознавания гигантских радиоисточников использовалось программное обеспечение Oblique Classifier One (OC1), реализующее метод дерева решений. Классификаторы OC1 были настроены на обучающую выборку, подготовленную на основе свойств 48 ГРИ из [Lara et al., 2001]. В результате был составлен каталог из 1616 ГРИ-кандидатов. Поскольку верификация ГРИ-кандидатов не проводилась, в каталоге, помимо собственно ГРИ, присутствуют радиоисточники меньших размеров, а также объекты, каждый из двух компонентов которых является самостоятельным радиоисточником, но алгоритм распознавания объединил их в один объект. В связи с этим требуется верификация ГРИ-кандидатов на предмет их принадлежности к гигантам.

Отождествление радиоисточников больших угловых размеров является непростой задачей. При низкой поверхностной яркости радиодолей распознать сам радиоисточник и его компоненты бывает сложно. Здесь надо использовать карты как низкочастотных, так и высокочастотных радиообзоров разного углового разрешения. Первые дают возможность определить протяженные структуры и угловой размер радиоисточника, а вторые — установить радиоядро и горячие точки и в конечном счете определиться с морфологией радиоисточника.

Если у кандидата есть радиоядро, совпадающее с оптическим объектом, то идентификация родительской галактики не вызывает сомнений и будет достоверной. Но если радиоядро не обнаруживается, то важно как можно точнее распознать радиоструктуру источника, тогда установить положение родительской галактики будет проще.

Мы дополнительно использовали данные ближнего и среднего ИК-диапазона для отождествления родительских галактик. Оптическое или ультрафиолетовое излучение, скрытое пылевыми структурами вокруг аккреционного диска активного ядра галактики (АЯГ), переизлучается в среднем ИК-диапазоне, тогда родительская галактика радиоисточника обычно выделяется среди других объектов. Например, предполагаемая родительская галактика будет ярче в К-полосе обзора LAS UKIDSS или в полосах W1 и W2 обзора WISE.

Мы использовали программные средства Aladin Sky Atlas [Bonnarel et al., 2000] для работы с каталогами и обзорами и TOPCAT [Taylor, 2005] для работы с таблицами.

При визуальном осмотре каждого NVGRC-объекта мы следовали определенной последовательности

действий. Сначала в стек Aladin загружались координаты объекта из каталогов NVSS и NVGRC и карты обзора NVSS. Для уточнения радиоструктуры использовались радиокарты обзоров GLEAM, Apertif, RACS-low, RACS-mid, TGSS, FIRST, VLASS, GB6. В большинстве случаев для определения радиоморфологии использовались карты VLASS.

Если на картах VLASS обнаруживается ядро радиисточника, то родительская галактика обычно совпадает с положением ядра. Для определения родительской галактики мы использовали оптические обзоры SDSS [Ahumada et al., 2020], PanSTARRS [Chambers et al., 2016], DES [Abbott et al., 2018], Legacy Surveys [Dey et al., 2019].

Если у источника радиодро не обнаруживалось, мы использовали изображения в полосах обзора WISE [Wright et al., 2010]. Объект, видимый в полосах W1 и W2 и удачно расположенный относительно радиоструктуры, считался предпочтительным кандидатом в родительские галактики.

Если на роль родительские галактики подходили два близких оптических объекта, то мы выбирали более яркий объект на изображениях обзоров ближнего инфракрасного диапазона LAS/GPS UKIDSS [Lawrence et al., 2007]. В некоторых случаях, чтобы отличить по собственному движению звезду от галактики и выбрать напарника радиисточнику из двух близко расположенных оптических кандидатов, мы использовали каталог Gaia [Vallenari et al., 2023].

Далее в базах данных SIMBAD [Wenger et al., 2000], NED [Helou et al., 1995], NOIRDataLab [Olsen et al., 2019] и VizieR [Ochsenbein et al., 2000] мы искали спектроскопическое или фотометрическое красное смещение родительской галактики, чтобы оценить проецируемый линейный размер NVGRC-объекта.

Мы считали два компонента NVGRC-объекта не связанными между собой, если каждый компонент отождествлялся с отдельной родительской галактикой.

2. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ГРИ-КАНДИДАТОВ

Для измерения угловых размеров радиисточников мы использовали карты обзора NVSS, как и в работе [Proctor, 2016]. Согласно классификации, предложенной Fanaroff, Riley [1974], к типу FRI относят радиисточники со спадающей к краям яркостью, к типу FRII — с уярчением к краям. Источники, у которых отмечаются признаки как FRI, так и FRII, относят теперь к гибридным.

Угловой размер источников FRII-типа обычно измеряется как расстояние между горячими точками. Неопределенности в измерениях возникают в основном в случае источников FRI-типа и гибридного типа FRI/FRII. Угловой размер таких объектов определяется по максимальному угловому расстоянию между краями радиодолей, где «край» источника определяется по отношению сигнал/шум. В случае источников, имеющих изогнутую структуру, угловые размеры измеряются по «гребню» источника [Kuźmicz et al., 2018].

В работе [Proctor, 2016] угловые размеры источников FRI-, FRII- и гибридного типов измерялись

по краю радиодолей на уровне $\approx 3\sigma$ выше фона. Мы следовали такой же методике.

Мы сравнивали проецируемые размеры ГРИ из нашей выборки с их же размерами, приведенными в работах [Kuźmicz et al., 2018; Dabhade et al., 2020; Oei et al., 2023], если такая информация имелаась.

Результаты сравнения представлены в табл. 1. В первом столбце таблицы приведены списки ГРИ, между которыми вычислена разница в проецируемых линейных размерах. Используются следующие обозначения: D20 — [Dabhade et al., 2020], K18 — [Kuźmicz et al., 2018], O23 — [Oei et al., 2023] и OL — наш список. Во втором столбце указано количество источников, совпавших в сравниваемых списках. В третьем столбце приведены средняя разница линейных размеров и среднеквадратичное отклонение в Мпк.

Таблица 1

Различия в определенных проецируемых линейных размерах для известных ГРИ, вошедших в нашу выборку

Сравниваемые списки	Число объектов	$\Delta D \pm RMS$
K18-D20	257	0.05 ± 0.35
O23-K18	19	0.20 ± 0.28
OL-O23	7	0.18 ± 0.21
OL-D20	51	0.29 ± 0.63
OL-K18	24	0.29 ± 0.18

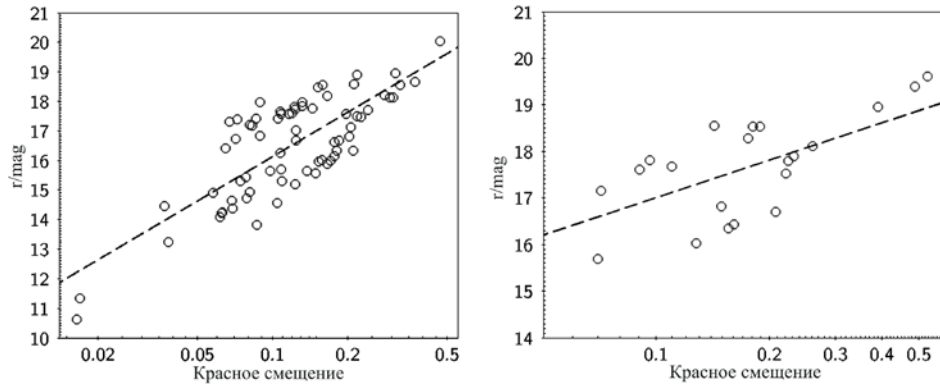
Систематическая разница 0.2–0.3 Мпк между нашими оценками линейного размера и значениями, полученными в работах [Kuźmicz et al., 2018; Dabhade et al., 2020; Oei et al., 2023], вероятнее всего, объясняется тем, что мы измеряли угловое расстояние не между горячими точками, а по краям долей радиисточника.

3. ТИПЫ РОДИТЕЛЬСКИХ ОБЪЕКТОВ

В каталог NVGRC были включены двойные радиисточники с угловым размером не менее $4'$. Для надежного отождествления родительской галактики крайне важно высокое угловое разрешение радиокарт. Мы использовали данные обзора VLASS (угловое разрешение $2.5''$), позволяющие четко выделить структуру радиосточника и определить положение радиодро, а также идентифицировать симметрично расположенные относительно ядра доли. Такая морфология характерна для активных галактик ранних типов и радиокварзаров. В отличие от них, радиоизлучение туманностей, пульсаров, молодых и активных звезд обычно имеет аморфную структуру, что позволяет надежно отличать их от радиогалактик. Исключения редки и, как правило, связаны с недостаточной детализацией радиокарт.

Для подтверждения правильности отождествления мы дополнительно привлекали глубокие обзоры в оптическом и ИК-диапазонах, а также данные о цветовых индексах оптических кандидатов и параметрах фотометрических профилей потенциальных родительских объектов из каталогов.

Восемнадцать источников из нашей выборки расположены в областях неба, близких к плоскости



Графики рассеяния точек для видимых звездных величин m_r и спектроскопических красных смещений z родительских объектов ГРИ: слева — для 71 гигантской радиогалактики, справа — для 23 гигантских радиоквazarов. Ось X отложена в логарифмическом масштабе

Галактики, где высока звездная плотность. Из них пять уже известны как ГРИ по ранее опубликованным данным, а остальные 13 демонстрируют типичную для радиогалактик морфологию. Совокупность морфологических и фотометрических признаков позволяет уверенно отнести нашу выборку ГРИ к внегалактическим объектам — галактикам или квазарам.

Для определения типа родительских объектов мы использовали информацию из баз данных SIMBAD, NED, Vizier, SDSS и LS.

Если для родительского объекта таких данных не было, мы устанавливали тип, применяя критерии для цветовых индексов, которые используются для отбора квазаров в работах [Glikman et al., 2018, 2022]. Цветовые индексы определяются по фотометрическим данным обзора WISE.

Для самых слабых оптических объектов мы анализировали вырезки из обзора WISE. Если объект был ярким в полосах W1 и W2, но отсутствовал в полосах W3 и W4, мы относили его к галактикам. Если объект оставался ярким в полосах W3 и W4, мы относили его к квазарам.

В результате мы разделили родительские объекты на галактики, квазары и галактики с ИК-избытком. Для последних показатели цвета соответствуют показателям цвета квазаров по фотометрии WISE, но сами объекты по профилю в оптических обзорах не относятся к звездным. В выборке доли родительских объектов по типам составили: галактики — 73 %, квазары — 12 %, галактики с ИК-избытком — 15 %. Для сравнения заметим, что среди родительских объектов ГРИ галактики составляют 82 % у Dabhade et al. [2020] и 80 % у Kuźmicz et al. [2018].

4. КРАСНЫЕ СМЕЩЕНИЯ РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК

Из 187 ГРИ 95 имеют спектральные красные смещения, 77 — фотометрические и для 15 информация о красных смещениях отсутствует.

Для оценки красного смещения родительских галактик ГРИ Lara et al. [2001] и Kuźmicz et al. [2018] используют зависимость между видимой звездной величиной родительских галактик ГРИ и их красным смещением.

Используя данные о видимой звездной величине ГРИ в фильтре r , исправленной за галактическое поглощение, и спектроскопические красные смещения z , мы построили линейную зависимость между ними. Фотометрические данные и спектроскопические красные смещения были взяты из обзоров PanSTARRS, LS и SDSS, а также из баз данных NED и SIMBAD.

Для 71 галактики получена следующая зависимость с коэффициентом корреляции $r=0.78$ (левая панель рисунка):

$$m_r \pm 1.07 = 5.00 \times \log(z) + 21.16,$$

где m_r — видимая звездная величина в фильтре r .

Для квазаров мы построили отдельную зависимость. Для этого были взяты 8 квазаров и 15 галактик, которые, согласно критерию индекса цвета WISE, классифицируются как квазары. Была получена следующая зависимость с коэффициентом корреляции $r=0.72$ (правая панель рисунка):

$$m_r \pm 0.75 = 2.66 \times \log(z) + 19.69.$$

Сравнив спектроскопические красные смещения со значениями, рассчитанными по полученным формулам, мы вычислили среднеквадратичные отклонения разности между ними, которые составили 0.07 для галактик и 0.15 для квазаров. Используя эти зависимости, мы оценили красное смещение 15 родительских объектов (12 галактик и трех квазаров).

Медианная величина красного смещения составила: для 95 объектов со спектроскопическим красным смещением — 0.14; для 77 объектов с фотометрическим красным смещением — 0.30; для 15 объектов с оценками красного смещения на основе найденных зависимостей — 0.61.

5. РАДИОМОРФОЛОГИЯ

Проведена морфологическая классификация ГРИ по картам обзоров NVSS и RACS, а также FIRST и VLASS. Согласно картам обзора NVSS, 10 % источников были отнесены к типу FRI, 4 % — к типу FRI/II и 86 % — к типу FR II.

В работах [Kuźmicz et al., 2018; Dabhade et al., 2020; Andernach et al., 2021] доля источников FR II составляет 90, 89 и 93 % соответственно.

Мы сравнили соотношение источников FRI- и FRII-типов в зависимости от красного смещения для списков ГРИ [Kuźmicz et al., 2018; Dabhade et al., 2020] и нашей выборки.

В табл. 2 представлена полученная статистика для четырех интервалов красного смещения. Обозначения списков такие же, как в табл. 1. Через косую черту приведено количество источников (FRI + FRI/II)/FRII. В последней строке таблицы указана средняя доля источников FRI в процентах относительно всех ГРИ, попадающих в данный интервал красного смещения.

Таблица 2

Количество источников типов FRI и FRII в интервалах красного смещения

Списки	$z < 0.05$	$0.05 \div 0.10$	$0.10 \div 0.15$	$0.15 \div 0.20$
D20	4/7	12/29	20/43	6/37
K18	7/5	13/35	10/34	2/32
OL	3/1	13/13	10/26	1/25
mean	52 %	33 %	28 %	9 %

Для близких красных смещений $z < 0.05$ общее количество источников FRI и FRI/II оказалось равным общему количеству источников FRII. Но уже на интервалах $z = 0.05 \div 0.15$ количество источников типа FRI и FRI/FRII заметно уменьшается, и при $z = 0.15 \div 0.20$ их доля составляет всего 9 %. Информации о доле источников FRI на красных смещениях $z > 0.2$ недостаточно для оценки.

Мы полагаем, что из-за низкой поверхностной яркости протяженных радиодолей, особенно во внешних областях, трудно обнаружить ГРИ FRI- и FRI/FRII-типов уже на $z > 0.2$. По этой причине их доля в списках ГРИ обычно невелика.

По результатам визуальной инспекции карт VLASS мы отнесли 10 % ГРИ к морфологическому типу «ядро-джет/ядро-доли» (Core-Jet/Core-Lobe, CJ/CL), 13 % — к двойным источникам (Double, D), 58 % источников — к двойным с ядром (Double-Core, DC) и 20 % источников — к тройным (Triple, T). Ядро имеется у источников всех морфологических типов, кроме D. Таким образом, 87 % источников имеют радиоядро, что позволяет надежно идентифицировать родительские объекты.

Искривление долей радиоисточника является индикатором его окружения и/или процессов, происходящих в непосредственной близости от активного ядра галактики. Так, «хвостатая» морфология (WAT, Wide-Angle Tailed, или NAT, Narrow-Angle Tailed) указывает на то, что источник находится в скоплении или группе галактик [Owen, Rudnick, 1976; Missaglia et al., 2019]. Мы отметили такую морфологическую особенность у 24 % ГРИ в нашей выборке.

X-, Z- и S-образная форма долей радиоисточника объясняется изменением ориентации джетов, вызванным либо слиянием небольшой галактики с массивной эллиптической родительской галактикой, либо нестабильностью аккреционного диска [Denneft-Thorpe et al., 2002; Joshi et al., 2019].

Двойные радиоисточники с двойными долями (Double-Double, DD) [Brocksopp et al., 2011], а также тройные радиоисточники [Gopal-Krishna et al., 2012],

у которых интегральная плотность потока от радио-ядра составляет > 10 % общей плотности потока источника, относят к АЯГ с рестартом джетов. Источники с S-, Z- и X-образной морфологией, а также DD- и T-радиоисточники мы объединили в одну группу, поскольку особенности их радиоструктуры указывают на процессы, происходящие вблизи активного ядра. Мы обнаружили такие особенности у 28 % источников.

У половины ГРИ из нашей выборки отмечена одна из упомянутых выше морфологических особенностей или их комбинация.

Сравнивая карты NVSS и VLASS, мы обнаружили, что некоторые источники имеют радиодоли на 1.4 ГГц, но они отсутствуют или слабо выражены на картах на 3 ГГц. Тем самым мы выявили радиоисточники, у которых подпитка джетов прекратилась, и они находятся в фазе угасания. В нашей выборке таких источников оказалось 74.

Если учесть встречаемость источников со слабо выраженными долями на картах VLASS, то у квазаров и галактик с ИК-избытком такая особенность встречается в 16 % случаев, а у галактик — в 47 % случаев.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНСПЕКЦИИ NVRSC-ОБЪЕКТОВ

Из 1616 объектов каталога NVGRC мы обследовали 370 (23 %) объектов в диапазоне прямых восхождений $00^h 00^m < R.A. < 05^h 20^m$. Были обследованы также радиоисточники с угловыми размерами от 2.5' и более, попадающие на радиокарты из обзора NVSS размером 1 кв. град. с центром на NVGRC-объекте.

Некоторые NVGRC-объекты включают компоненты, которые являются физически не связанными радиоисточниками. Встречаются случаи, когда один компонент NVGRC-объекта принадлежит радиоисточнику, классифицированному нами как ГРИ, а другой компонент не связан с первым компонентом. Было обнаружено 18 ГРИ, которые попали в обследуемые нами области, но не вошли в каталог NVGRC.

Для 187 источников, подтвержденных нами как ГРИ, из рассмотренных 370 NVRSC-объектов и источников, попавших в область размером 1 кв. град., получена следующая статистика:

- Родительские объекты 70 гигантских радиогалактик (ГРГ) имеют спектроскопические красные смещения, из них 44 объекта являются известными ГРГ, а 26 новых ГРГ были открыты нами, причем четыре из них не включены в каталог NVGRC.
- 55 ГРГ имеют фотометрические красные смещения, из них 11 объектов включены в список [Dabhade et al., 2020], 44 были подтверждены нами, причем четыре из них не включены в каталог NVGRC.
- 25 гигантских радиоквазаров (ГРК) и галактик с ИК-избытком имеют спектроскопические красные смещения. Девять были открыты нами, причем три из них не включены в каталог NVRSC.
- 22 ГРК имеют фотометрические красные смещения. 16 были обнаружены нами впервые, и четыре из них не включены в каталог NVGSC.
- Для 15 родительских объектов отсутствует опубликованная информация о красном смещении.

Мы провели оценки красного смещения этих объектов, используя полученные нами соотношения между видимой звездной величиной и красным смещением.

Нам не удалось уверенно определить радиоструктуру семи NVGRC-объектов: J000106.4+340303, J005451.5+564842, J021329.0+292139(2), J025347.1–200007, J032145.1+514855, J035800.3–393629(2), J050341.2–191142.

У трех объектов — J011352.3+622434, J043503.2+215527, J051219.4+131945 — очень слабые в оптике родительские галактики. Они видны только на вырезках обзора PanSTARRS, но отсутствуют в каталоге PanSTARRS. Их положение относительно радиоструктуры хорошо совпадает с предполагаемым центром источника. Заметим, что источники J011352.3+622434 и J051219.4+131945 присутствуют в каталоге WISE.

Из 187 ГРИ 78 уже были известны как гиганты по публикациям [Lara et al., 2001; Schoenmakers et al., 2001; Kuźmicz, Jamrozy, 2012; Kuźmicz et al., 2018; Dabhade et al., 2020; Oei et al., 2023].

Было обнаружено, что два NVRSC-объекта — J005748.3+302114 и J010001.3+300249 — являются одним радиоисточником, так же как и следующие NVRSC-объекты: J022318.0+425939 и J022251.6+425744, J050533.7–285707 и J050540.8–282445, J051601.7+245826 и J051605.7+245833.

J024733.6+615632 и J035322.1+355212 являются III-областям.

Итак, из 370 NVGRC-объектов 169 были подтверждены как ГРИ. Остальные объекты либо имеют размеры менее 0.7 Мпк, либо являются физически не связанными между собой радиоисточниками, которые были объединены в один радиоисточник алгоритмом распознавания.

Площадь неба, обследованная нами с помощью вырезок NVSS, составляет около 370 кв. град. Площадь неба в диапазоне прямых восхождений от 00^h00^m до 05^h20^m составляет около 8600 кв. град. Из 187 ГРИ, попавших в обследованные области, 18 были пропущены алгоритмом распознавания и не включены в каталог NVGRC. Исходя из этого, количество объектов, пропущенных алгоритмом в указанном интервале прямых восхождений, может составлять 420. Таким образом, эффективность алгоритма распознавания составляет ≈30 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы визуально обследовали 370 объектов каталога NVGRC, которые были отобраны с помощью алгоритма распознавания образов из каталога NVSS в качестве кандидатов в гигантские радиоисточники, с целью подтверждения их принадлежности к ГРИ. Были обследованы также окружающие NVGRC-объекты области размером порядка 1 кв. град. Для 45 % обследованных радиоисточников мы подтвердили принадлежность к ГРИ, 29 % имеют размеры менее 0.7 Мпк, а 26 % представляют собой независимые источники, объединенные алгоритмом распознавания в один радиоисточник. В областях около NVGRC-объектов было обнаружено 18 ГРИ, которые отсутствуют в каталоге NVGRS.

Согласно картам VLASS, 87 % ГРИ имеют радиоядро, что позволяет надежно идентифицировать родительские объекты.

При определении типа родительского объекта мы в основном использовали информацию из баз данных SIMBAD и NED. Если эта информация для объектов отсутствовала, мы применили критерии, разделяющие галактики и квазары по данным фотометрии WISE. Это в основном использовалось для слабых в оптике объектов. В результате наша выборка ГРИ включает 73 % галактик, 15 % галактик с ИК-избытком и 12 % квазаров.

Для родительских объектов с известными спектроскопическими красными смещениями были определены зависимости между видимыми звездными величинами и красными смещениями как для галактик, так и для квазаров. Эти зависимости были применены для оценки красных смещений 15 NVGRC-объектов, для которых нам не удалось найти красные смещения. С использованием оценочных красных смещений мы подтвердили принадлежность этих объектов к ГРИ.

Из 187 ГРИ, подтвержденных нами, 78 — 56 галактик, 16 галактик с ИК-избытком и 6 квазаров — ранее были известны как гиганты по публикациям. Принадлежность 109 источников к ГРИ подтверждена нами впервые. Из них для 94 ГРИ известны спектроскопические или фотометрические красные смещения их родительских галактик и для 15 ГРИ красные смещения были оценены с использованием полученных нами для галактик и квазаров зависимостей $m_r - z$.

По NVSS-картам мы классифицировали 86 % источников как FRII, а остальные как FRI и FRI/FRII. Мы подсчитали количество ГРИ типов FRI и FRII в четырех интервалах красного смещения. При $z < 0.05$ доли источников типа FRI и FRII были примерно равны, но уже при $z > 0.15$ доля источников типа FRI резко уменьшалась. Таким образом, преобладание источников типа FRII в списках ГРИ, скорее всего, связано с наблюдательной селекцией, обусловленной чувствительностью существующих радиообзоров.

Сравнивая карты NVSS и VLASS, мы обнаружили, что 40 % источников можно классифицировать как угасающие. У 25 % радиоисточников наблюдается повторная фаза. У 37 % источников наблюдаются изогнутые радиолепестки, что указывает на нахождение радиоисточника в группе или скоплении галактик. При визуальном изучении карт оптических обзоров мы отметили наличие близких соседей у некоторых родительских галактик ГРИ. По особенностям радиоморфологии и по информации из публикаций соседи были обнаружены у 121 радиоисточника. Таким образом, не менее 65 % ГРИ находятся в довольно плотном окружении.

Результаты работы приведены в таблице, расположенной по адресу [<https://www.sao.ru/hq/zhe/ProctorGRSres.txt>]. В этом же файле приведено описание колонок таблицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Abbott T., Abdalla F., Allam S., et al. The Dark Energy Survey: Data release 1. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2018, vol. 239, iss. 2, 18, 25 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aae9f0>.

- Aghanim N., Akrami Y., Ashdown M., et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys.* 2020, vol. 641, A6, 67 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>.
- Ahumada R., Allende P., Almeida A., et al. The 16th data release of the Sloan Digital Sky Surveys: First release from the APOGEE-2 Southern Survey and full release of eBOSS Spectra. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2020, vol. 249, iss. 1, 3. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab929e>.
- Andernach H., Jiménez-Andrade E., Willis A. Discovery of 178 giant radio galaxies in 1059 deg² of the Rapid ASKAP Continuum Survey at 888 MHz. *Galaxies*. 2021, vol. 9, iss. 4, id. 99. <https://doi.org/10.3390/galaxies9040099>.
- Bonnarel F., Fernique P., Bienaymé O., et al. The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources. *Astron. Astrophys. Suppl.* 2000, vol. 143, p. 33–40. <https://doi.org/10.1051/aas:2000331>.
- Brocksopp C., Kaiser C., Schoenmakers A., et al. Double-double radio galaxies: further insights into the formation of the radio structures. *MNRAS*. 2011, vol. 410, iss. 1, pp. 484–498. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17456.x>.
- Chambers K., Magnier E., Metcalfe N., et al. The Pan-STARRS1 Surveys. *eprint arXiv: 1612.05560*, 2016, 38 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.05560>.
- Condon J., Cotton W., Greisen E., et al. The NRAO VLA Sky Survey. *Astronom. J.* 1998, vol. 115, iss. 5, pp. 1693–1716. <https://doi.org/10.1086/300337>.
- Dabhade P., Gaikwad M., Bagchi J., et al. Discovery of giant radio galaxies from NVSS: radio and infrared properties. *MNRAS*. 2017, vol. 469, iss. 3, pp. 2886–2906. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx860>.
- Dabhade P., Mahato M., Bagchi J., et al. Search and analysis of giant radio galaxies with associated nuclei (SAGAN). I. New sample and multi-wavelength studies. *Astron. Astrophys.* 2020, vol. 642, A153, 31 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038344>.
- Dennett-Thorpe J., Scheuer P., Laing R., et al. Jet reorientation in active galactic nuclei: two winged radio galaxies. *MNRAS*. 2002, vol. 330, iss. 3, pp. 609–620. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05106.x>.
- Dey A., Schlegel D., Lang D., et al., Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys. *Astronom. J.* 2019, vol. 157, iss. 5, 168, 29 p. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab089d>.
- Enßlin T., Gopal-Krishna. Are cluster radio relics revived fossil radio cocoons? *Particles and Fields in Radio Galaxies Conference, ASP Conf. Proc.* 2001, Vol. 250, p. 454. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000198>.
- Fanaroff B., Riley J. The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity. *MNRAS*. 1974, vol. 167, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1093/mnras/167.1.31P>.
- Glikman E., Lacy M., LaMassa S., et al. Luminous WISE-selected obscured, unobscured, and red quasars in Stripe 82. *Astrophys. J.* 2018, vol. 861, iss. 1, 37, 27 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac5d8>.
- Glikman E., Lacy M., La Massa S., et al. The WISE-2MASS Survey: Red quasars into the radio quiet regime. *Astrophys. J.* 2022, vol. 934, iss. 2, 119, 24 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6bee>.
- Gopal-Krishna, Biermann P., Gergely L., et al. On the origin of X-shaped radio galaxies. *Res. Astron. Astrophys.* 2012, vol. 12, iss. 2, pp. 127–146. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/2/002>.
- Hardcastle M., Cheung C., Feain I., et al. High-energy particle acceleration and production of ultra-high-energy cosmic rays in the giant lobes of Centaurus A. *MNRAS*. 2009, vol. 393, iss. 3, pp. 1041–1053. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14265.x>.
- Helou G., Madore B., Schmitz M., et al. The NASA/IPAC Extragalactic Database. *Information & On-Line Data in Astronomy*. 1995, p. 95. (Astrophys. Space Sci. Library, vol. 203). https://doi.org/10.1007/978-94-011-0397-8_10.
- Joshi R., Krishna G., Yang X., et al. X-shaped radio galaxies: Optical properties, large-scale environment, and relationship to radio structure. *Astrophys. J.* 2019, vol. 887, iss. 2, 266, 13 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab536f>.
- Kaiser C., Dennett-Thorpe J., Alexander P. Evolutionary tracks of FR II sources through the P-D diagram. *MNRAS*. 1997, vol. 292, iss. 3, pp. 723–732. <https://doi.org/10.1093/mnras/292.3.723>.
- Komberg B., Pashchenko I. Giant radio galaxies: Old long-lived quasars? *Astronomy Rep.* 2009, vol. 53, iss. 12, pp. 1086–1100. <https://doi.org/10.1134/S1063772909120026>.
- Kronberg P. Extragalactic magnetic fields. *Reports on Progress in Physics*. 1994, vol. 57, iss. 4, pp. 325–382. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/57/4/001>.
- Kronberg P., Dufton Q., Li H., et al. Magnetic energy of the intergalactic medium from galactic black holes. *Astrophys. J.* 2001, vol. 560, iss. 1, pp. 178–186. <https://doi.org/10.1086/322767>.
- Kronberg P., Colgate S., Li H., et al. Giant radio galaxies and cosmic-ray acceleration. *Astrophys. J.* 2004, vol. 604, iss. 2, pp. L77–L80. <https://doi.org/10.1086/383614>.
- Kuźmicz A., Jamroz M. Optical and radio properties of giant radio quasars: Central black hole characteristics. *MNRAS*. 2012, vol. 426, iss. 2, pp. 851–867. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21576.x>.
- Kuźmicz A., Jamroz M., Bronarska K., et al. An updated catalog of giant radio sources. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2018, vol. 238, iss. 1, 9, 9 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aad9ff>.
- Lara L., Cotton W., Feretti L., et al., A new sample of large angular size radio galaxies. I. The radio data. *Astron. Astrophys.* 2001, vol. 370, pp. 409–425. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010254>.
- Lawrence A., Warren S. J., Almaini O. The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS). *MNRAS*. 2007, vol. 379, iss. 4, pp. 1599–1617. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12040.x>.
- Machalski J., Jamroz M., Zola S., et al. The new sample of giant radio sources. II. Update of optical counterparts, further spectroscopy of identified faint host galaxies, high-frequency radio maps, and polarization properties of the sources. *Astron. Astrophys.* 2006, vol. 454, iss. 1, pp. 85–94. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054672>.
- Malarecki J., Jones D., Saripalli L., et al. Giant radio galaxies — II. Tracers of large-scale structure. *MNRAS*. 2015, vol. 449, iss. 1, pp. 955–986. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv273>.
- Missaglia V., Massaro F., Capetti A., et al. WATCAT: A tale of wide-angle tailed radio galaxies. *Astron. Astrophys.* 2019, vol. 626, A8, 19 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935058>.
- Mostert R.I.J., Oei M.S.S.L., Barkus B., et al. Constraining the giant radio galaxy population with machine learning and Bayesian inference. *Astron. Astrophys.* 2024, vol. 691, A185, 25 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348897>.
- Ochsenbein F., Bauer P., Marcout J. The VizieR database of astronomical catalogues. *Astron. Astrophys. Suppl.* 2000, vol. 143, p. 23–32. <https://doi.org/10.1051/aas:2000169>.
- Oei M., van Weeren R., Hardcastle M., et al. The discovery of a radio galaxy of at least 5 Mpc. *Astron. Astrophys.* 2022, vol. 660, A2, 17 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142778>.
- Oei M., van Weeren R., Gast A., et al. Measuring the giant radio galaxy length distribution with the LoTSS. *Astron. Astrophys.* 2023, vol. 672, A163, 41 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243572>.
- Olsen K., Bolton A., Juneau S., et al. The Data Lab: A Science Platform for the analysis of ground-based astronomical

- survey data. Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2019, vol. 51, iss. 7, 61.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.05130>.
- Owen F., Rudnick L. Radio sources with wide-angle tails in Abell clusters of galaxies. *Astrophys. J. Lett.* 1976, vol. 205, pp. L1–L4. <https://doi.org/10.1086/182077>.
- Proctor D. A Selection of Giant Radio Sources from NVSS. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2016, vol. 224, iss. 2, 18, 13 p. <https://doi.org/10.3847/0067-0049/224/2/18>.
- Safouris V., Subrahmanyan R., Bicknell G.V., et al. MRCB0319-454: probing the large-scale structure with a giant radio galaxy. *MNRAS*. 2009, vol. 393, iss. 1, pp. 2–20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14181.x>.
- Schoenmakers A., de Bruyn A., Röttgering H., et al. A new sample of giant radio galaxies from the WENSS survey. I. Sample definition, selection effects and first results. *Astron. Astrophys.* 2001, vol. 374, pp. 861–870. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010746>.
- Solovyov D., Verkhodanov O. Search for and study of weak radio galaxies with large angular sizes using the NVSS data. *Astronomy Reports*. 2014, vol. 58, iss. 8, pp. 506–515. <https://doi.org/10.1134/S106377291408006X>.
- Taylor M. TOPCAT & STIL: Starlink Table/VOTable Processing Software. *ADASS XIV ASP Conf. Ser.* 2005, vol. 347, p. 29.
- Vallenari A., Brown A. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties. *Astron. Astrophys.* 2023, vol. 674, A1, 22 p. <https://doi.org/10.1093/mnras/167.1.31P>.
- van Weeren R., Röttgering H., Brüggem M., et al. Particle acceleration on megaparsec scales in a merging galaxy cluster. *Science*. 2010, vol. 330, iss. 6002, p. 347. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0584-z>.
- Verkhodanov O., Solovyov D., Ulakhovich O., et al. A comparison of properties of different population radio galaxies based on the Planck mission microwave data. *Astrophys. Bull.* 2016, vol. 71, iss. 2, pp. 139–150. <https://doi.org/10.1134/S1990341316020024>.
- Wenger M., Ochsenbein F., Egret D. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects. *Astron. Astrophys. Suppl.* 2000, vol. 143, p. 9–22. <https://doi.org/10.1051/aas:2000332>.
- Wright E., Eisenhardt P., Mainzer A., et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance. *Astronom. J.* 2010, vol. 140, iss. 6, pp. 1868–1881. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/140/6/1868>.
 URL: <https://www.sao.ru/hq/zhe/ProctorGRSres.txt> (дата обращения 10 февраля 2026 г.).

Как цитировать эту статью:

Желенкова О.П., Хоруженко М.В. Анализ кандидатов в гигантские радиосточники на основе многоволновых данных. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 2, с. 97–104. <https://doi.org/10.12737/szf-122202610>.