

АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

имени П.Н. Лебедева РАН

на правах рукописи

Пащенко Илья Николаевич

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАДИОИСТОЧНИКОВ НА
РАЗЛИЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ МАСШТАБАХ**

(Специальность 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2011 г.

Работа выполнена в теоретическом отделе Астрокосмического Центра Учреждения Российской академии наук Физического Института им. П.Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Комберг Борис Валентинович (АКЦ ФИАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Верходанов Олег Васильевич (САО РАН)

кандидат физико-математических наук
Тюльбашев Сергей Анатольевич (ПРАО АКЦ ФИАН)

Ведущая организация:

Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ)

Защита состоится ___ апреля 2011г. в ___ – на заседании диссертационного Совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) в конференц-зале Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд №2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, с авторефератом диссертации – на сайте <http://www.asc-lebedev.ru>

Отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д002.023.01.

Автореферат разослан «___» _____ 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.023.01
доктор физ.-мат. наук

Ю. А. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Гигантские радиисточники (РИ) с размерами протяженных радиокомпонент (ПРК) $D > 1$ Мпк (при $H_0 = 50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, принятом на момент их обнаружения) были впервые обнаружены в 1974 году (Willis и др. 1974). Ими оказались гигантские радиогалактики (РГ): 3C236 ($z \approx 0.1$) и DA240 ($z \approx 0.04$) с размерами около 5 и 2 Мпк соответственно. Исследования этого редкого класса радиисточников (к настоящему времени известно уже около 140 гигантских РИ (Jamrozny и др. 2003), (Saripalli и др. 2005) с красными смещениями $z \leq 1.8$ ($\bar{z} = 0.3$) и угловыми размерами до десятка угловых минут представляется интересным по нескольким причинам. Во-первых, исследование гигантских радиисточников может помочь понять, как радиисточник эволюционирует со временем, и какие физические параметры влияют на его эволюцию. Во-вторых, благодаря гигантским линейным размерам возникает возможность использования протяженных структур гигантских радиисточников в качестве “зондов” межгалактической среды (МГС), так как “радиоуши” гигантских радиисточников выходят далеко за пределы хозийской галактики. Интересен вопрос о возможной связи между вытянутостью протяженных радиокомпонент гигантских радиисточников и распределением галактик в их окрестности. Кроме того, большой угловой размер гигантских радиисточников делает возможным их вклад в наблюдаемую мелкомасштабную (на масштабах угловых минут) анизотропию реликтового излучения за счет эффекта Зельдовича-Сюняева (ЗС) на релятивистских электронах в протяженных радиокомпонентах гигантских радиисточников (Colafrancesco 2008).

Однако до сих пор остается непонятным, какие именно причины приводят к формированию гигантских размеров этого класса радиисточников. Ими могут быть или особые внешние условия (например, низкая плотность межгалактической среды, в которой распространяется выброс (Mask и др. 1998)), или исключительные внутренние свойства “центральной машины” радиисточника (например,

большая мощность выброса или время жизни радиисточника (Sabrahamayan и др. 1996)). Возможно, что ни одна из перечисленных причин не является исключительной, и для формирования гигантского радиисточника необходимо выполнение сразу нескольких из них (Machalski и др. 2002).

В первой главе представленной диссертации рассматриваются некоторые особенности гигантских радиисточников как класса: относительное число радиисточников различной спектральной классификации в оптическом диапазоне и асимметрии их протяженных радиокомпонент, свойства локального (на масштабах ~500 кпк) окружения. Проводится сравнение со свойствами радиисточников нормального размера с целью выявления возможных причин формирования гигантских радиисточников и асимметрий их протяженных радиокомпонент.

В последние годы в литературе активно обсуждается проблема обратного влияния активности в ядрах галактик на межзвездную среду (МЗС) и на темп звездообразования (ЗО) в хозяйских галактиках - например, (Gopal-Krishna и др. 2002), (Allen и др. 1999), (Reynolds и др. 2002), (Churazov и др. 2001). Кроме того, выяснилось, что активность в ядрах может оказывать заметное влияние на темп аккреции на центр и, как следствие, на скорость роста Сверхмассивной Черной Дыры (СЧД) (например, (Umemiga 2004), (King 2005)). Даже за пределами хозяйской галактики свойства окружающей газовой среды будут определяться уровнем активности ядра. Согласно, например (Heinz & Churazov 2005), (Dunn и др. 2005), активность в ядре центральной галактики скопления может приводить к исчезновению так называемых “остывающих потоков” (cooling flows), которые без этого должны были бы наблюдаться в центральных областях богатых скоплений галактик. Больше того, как показали наблюдения, взаимодействие радиовыбросов из АЯГ с облаками газа в хозяйской галактике или даже в межгалактической среде может приводить к звездообразованию в последних. Примером этому может служить ситуация с Объектом Минковского (ОМ) (Minkowski 1958). Интенсивное звездообразование в ОМ, по-видимому, связано с воздействием на облака газа со стороны радиовыброса из ядра соседней

галактики NGC 541 (Simkin 1976). Как результаты численных расчетов столкновения радиовыброса с облаком газа (Fragile и др. 2004), так и последние широкополосные наблюдения *ОМ* в оптическом (в том числе и в линии H_α), УФ и радиодиапазоне (Croft и др. 2006) подтверждают это предположение.

ОМ является на сегодняшний день не единственным объектом, демонстрирующим влияние радиовыброса на *ЗО* в облаках МЗС или в соседних с галактикой областях МГС. Вообще, эффект совпадения областей радио, УФ и оптического излучения – как в континууме, так и в линиях (radio-optical alignment effect (Chambers и др. 1987), (McCarthy и др. 1987)), интерпретируемый как индуцируемое выбросом (jet induced) звездообразование (см. например (Rees 1989)), довольно часто встречается, в особенности на больших красных смещениях¹. Это связано с тем, хозяйские галактики далёких ($z > 2$) радиогалактик находятся в состоянии формирования и, соответственно, их выбросы распространяется через достаточно плотную газовую среду.

Интересным является вопрос о возможной роли выброса на процесс *ЗО* или даже активность ядра в пространственно близких (т.е. соседних) с радиоисточником галактиках. Если роль выброса в индуцировании *ЗО* (правда пока лишь в маломассивных объектах - типа *ОМ*) подтверждается наблюдательно, то возможную роль выброса как триггера АЯГ-активности можно пока лишь предполагать. В работе (Evans и др. 2008) исследовано взаимодействие выброса близкой радиогалактики Fanaroff-Riley типа II 3С321 с близкой (проекционное удаление ~ 10 кпк) галактикой-компаньоном, находящейся в общей звездной оболочке с хозяйской галактикой 3С321. Интересно, что галактика-компаньон сама содержит АЯГ, и авторы рассматривают возможность того, что активность в ней могла быть индуцирована столкновением с выбросом от АЯГ 3С321.

Вторая глава представленной диссертации как раз посвящена изучению возможного влияния радиовыброса из АЯГ на активность (как звездообразование, так и активность ядра) в соседних галактиках.

¹ самым изученным примером эффекта наложения является далёкая ($z = 3.8$) радиогалактика 4С41.17 (Deu и др. 1997)

Одной из важнейших задач наблюдательной космологии является задача поиска “стандартной свечи” или “стандартной линейки” - астрофизических объектов с известными величинами светимости или линейного размера или поиск величин с известной эволюционной историей для оценок расстояний, не прибегая к данным по красным смещениям. Например, зависимость от красного смещения наблюдаемого потока или углового размера для подобных объектов позволила бы уточнить важнейшие космологические параметры. Так, построение первой зависимости (Хаббловской диаграммы) для Сверхновых типа Ia впервые предоставило прямые свидетельства в пользу ускоренного расширения Вселенной (Kessler и др. 2009).

Космологический тест “угловой размер - красное смещение “ θ - z ” как возможный способ выбора космологической модели был предложен более пятидесяти лет назад Фредом Хойлом (Hoyle 1959). В этом тесте характерной ожидаемой особенностью для космологических моделей с достаточной средней плотностью материи Ω_M является практически независимость углового размера “стандартной линейки” от красного смещения z в некотором его диапазоне. Конкретная величина диапазона зависит от параметров космологической модели. Так, для модели с критической плотностью материи $\Omega_M \sim 1$, ожидается минимальное значение θ при $z \sim 1$, сопровождающееся последующим увеличением углового размера с красным смещением. В современной стандартной модели с $\Omega_\Lambda = 0.7$, $\Omega_M = 0.3$ этот минимум не так ярко выражен.

Особенно привлекательным оказалось использование “ θ - z ” - теста в радиодиапазоне. Мощные радиогалактики и радиогромкие квазары, видимые на космологических расстояниях на масштабах угловых секунд-минут дуги, обладают противоположно направленными, уярчающимися к краю выбросами, заканчивающимися в компактных ярких образованиях – “горячих пятнах”. Расстояние между этими деталями и послужило первым вариантом “стандартной линейки” в радиодиапазоне. Оказалось, что зависимость соответствующего углового размера от красного смещения является “евклидовой” (то есть угловой размер $\theta \sim 1/z$, где z - красное смещение), что противоречит предсказаниям модели Фридмана-Леметра-Робертсона-Уолкера (Miley 1968), (Legg 1970), (Karahi 1989). Авторы (Singal 1993) и (Nilsson и др. 1993) показали, что подобная зависимость

может быть следствием эффектов эволюции радиоисточника, а именно, корреляции “светимость - линейный размер”. Более светимые радиоисточники, наблюдаемые на больших красных смещениях в ограниченной по потоку выборке, имеют меньшие линейные размеры. Это и приводит к более быстрому падению углового размера с ростом красного смещения по сравнению с предсказаниями стандартной космологической модели. Авторы (Blundell и др. 1999) назвали этот эффект “вырождением молодость - красное смещение” (“youth-redshift degeneracy”) и связали меньшие линейные размеры более мощных радиоисточников с нахождением их в более ранней стадии эволюции.

Компактные радиоисточники, наблюдаемые на РСДБ, свободны от подобных эффектов (Kellermann 1993). Во-первых, их времена жизни составляют порядка неск. лет (а не десятков миллионов лет в случае протяженных радиоконформент на угловых масштабах секунд дуги). Это гарантирует отсутствие космологической эволюции их линейных размеров². Во-вторых, свойства “центральных машин” радиогромких Активных Ядер Галактик (АЯГ) скорее всего, лежат в достаточно узких пределах (Gurvits и др. 1999). Кроме того, масштабы миллисекунд дуги на космологических расстояниях соответствуют парсекам - то есть, рассматриваемые источники лежат в ядре хозяйской галактики радиогромкого АЯГ. Таким образом, свойства радиоструктуры не зависят от свойств межгалактической среды/среды хозяйского скопления/группы, которые, как известно, эволюционируют с красным смещением (Wilcots 2009). Наконец, в ограниченные по потоку РСДБ-выборки попадают радиоисточники с узким диапазоном углов выброса к лучу зрения (вблизи угла $\theta \sim 1/(2\gamma)$, где γ - Лоренц-фактор объемного движения вещества выброса) (Vermeulen & Cohen 1994). Это минимизирует влияние эффектов проекции.

² Однако полностью не исключена и космологическая эволюция свойств “центральных машин”, формирующих выбросы.

Таким образом, на первый взгляд, использование компактных (наблюдаемых на РСДБ-масштабах) радиоисточников, а также их ядер³ (в сложившейся терминологии - ультракомпактных радиоисточников) в космологическом тесте "угловой размер - красное смещение" кажется достаточно обоснованным. Например, в работе (Jackson 2008) утверждается о том, что ультракомпактные радиоисточники могут рассматриваться как космологические "стандартные линейки". Однако, как показано в настоящей работе, некоторые инструментальные эффекты, связанные, прежде всего, с конечным разрешением наземных РСДБ-наблюдений, могут приводить к неверной интерпретации космологического теста и индуцировать корреляции между наблюдаемыми параметрами радиоисточников, не связанные с их физическими свойствами. Глава 3 настоящей диссертации как раз и посвящена этой проблеме.

Цель работы

Целью настоящей работы является:

- 1) Выяснение условий, способствующих формированию гигантских радиоисточников на основе данных наблюдений в оптическом и радиодиапазонах.
- 2) Исследование возможного влияния радиовыброса из АЯГ на процесс звездообразования и/или активность ядра в пространственно близких (т.е. соседних) с радиоисточником галактиках на основе данных обзоров SDSS (York и др. 2000) и FIRST (Becker и др. 1994). Оценка вероятности возникновения "объектов Минковского".
- 3) Исследование инструментальных эффектов в космологическом тесте "угловой размер – красное смещение", проводимом с использованием ультракомпактных радиоисточников.

³ Под "РСДБ-ядром" принято понимать основание РСДБ-выброса - обычно самую яркую деталь на РСДБ-изображении радиоисточника, имеющую плоский спектр.

Научная новизна

1. В результате работы получен вывод о равной доли квазаров (или, в общем, объектов с широкими линиями излучения) среди объектов с оптическими спектрами высокого возбуждения (High Excitation Radio Sources) в выборке гигантских радиоисточников и изотропных выборках, что, в рамках “Унифицированной Схемы”, свидетельствует об изотропном распределении углов радиовыбросов гигантских радиоисточников к лучу зрения.
2. Впервые из обнаруженного сходства распределений асимметрии для гигантских радиогалактик и гигантских радиогромких квазаров, сделан вывод о неоднородности внешних условий, как причине формирования асимметрий гигантских радиоисточников.
3. Проведено целенаправленное изучение ближайшего (на масштабах ~ 500 кпк) оптического окружения гигантских радиоисточников, которое не обнаружило различий их богатства окружения с окружением радиоисточников нормального размера, что свидетельствует статистически об отсутствии влияния окружения на формирование гигантских радиоисточников.
4. Впервые проведена оценка отношения средних возрастов гигантских радиоисточников и радиоисточников нормального размера по относительному числу радиоисточников с морфологией протяженных радиокомпонент типа “Double-Double” в обеих популяциях. На основании совпадающего отношения числа квазаров к радиогалактикам в популяциях гигантских и нормальных радиоисточников предсказано существование долгоживущей популяции радиогромких квазаров, по численности составляющих $\sim 10\%$ от всех радиогромких квазаров.
5. В работе впервые проведено исследование роли радиовыброса из АЯГ на активность (звездообразование - ЗО) и/или активность в ядре - АЯГ) в пространственно близких (проекционное удаление < 150 кпк, относительная лучевая скорость < 600 км/с) парах галактик с радиоисточником. На основе данных каталогов SDSS, FIRST и NVSS (Condon и др. 1998) представлены близкие пары галактик, являющиеся кандидатами на роль объектов, в которых возможно проявление эффекта радио-индуцированной активности (“объекты Минковского”).

6. Получен результат о возможном влиянии инструментальных эффектов на интерпретацию космологического теста “угловой размер – красное смещение”, проводимого с использованием ультракомпактных радиоисточников.

Научная и практическая ценность работы

1. Полученные в работе выводы о преобладающей роли внешней среды в формировании асимметрии протяженных радиокомпонент гигантских радиоисточников могут быть использованы для исследования неоднородностей межгалактической среды по величине их асимметрии.

2. Предположение о том, что протениторами гигантских радиоисточников являются популяция $\approx 10\%$ радиоисточников Fanaroff-Riley типа II, имеющих на порядок бóльшие времена жизни, позволяет связать наличие таких объектов с возможными свойствами работы их “центральных машин”, которые включают в себя особенности аккреции на СЧД, величину спина или массу СЧД. Всё это позволяет сузить круг возможных условий, необходимых для возникновения гигантских радиоисточников.

3. Проведенный на основе данных каталогов SDSS и FIRST сравнительный статистический анализ показал невозможность на данном этапе получения по спектроскопическим данным значимых выводов о присутствии в близких парах галактик радиоиндуцированной активности. Это связано с малым объемом полученных выборок. Представленные в работе примеры конкретных пар-кандидатов на роль объектов, демонстрирующих эффект радио-индуцированной активности, должны стать предметом отдельных исследований этого феномена, впервые отмеченного Р. Минковским.

4. Полученный результат о возможном влиянии инструментальных эффектов на интерпретацию космологического теста “угловой размер – красное смещение”, проводимого с использованием ультракомпактных радиоисточников, может быть использован для ограничения круга объектов-кандидатов на роль “космологических линеек”.

Апробация результатов

Результаты, изложенные в работе, активно обсуждались с коллегами из АКЦ ФИАН, ГАИШ и докладывались автором на семинарах и конференциях:

1. Астрофизический семинар в АКЦ ФИАН, 18 февраля 2008
2. Отчётная сессия АКЦ ФИАН, Пушино, 2008 г.
3. Отчётная сессия АКЦ ФИАН, Пушино, 2009 г.
4. XXV конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пушино, 2008 г.
5. XXVI конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пушино, 2009 г.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Доля объектов с широкими линиями излучения среди гигантских радиоисточников со спектрами высокого возбуждения оказывается такой же, как и для изотропных выборок радиоисточников. В рамках “Унифицированной Схемы” это свидетельствует об изотропном распределении углов радиовыбросов гигантских радиоисточников к лучу зрения. То есть, гигантские радиоисточники не являются популяцией объектов с радиовыбросами в плоскости неба.
2. По распределению различных параметров асимметрии протяженных радиокомпонент гигантские радиоисточники не отличаются от радиоисточников нормального размера. Однако, впервые из факта сходства распределений асимметрии для гигантских радиогалактик и гигантских радиогромких квазаров в рамках “Унифицированной Схемы” получен вывод о том, что причиной формирования асимметрии протяженных радиокомпонент гигантских радиоисточников является неоднородность внешних условий.
3. Впервые проведено целенаправленное изучение оптического окружения гигантских радиоисточников. По богатству и

характеру окружения они не отличаются от радиоисточников Fanaroff-Riley типа II нормального размера. Хозяйские галактики гигантских радиоисточников встречаются как практически изолированными, так и в скоплениях вплоть до богатства класса 1 по Эйбллу (Abell 1958), что исключает низкую плотность внешней среды как единственную причину формирования гигантских размеров радиоисточников.

4. Относительно большая доля радиоисточников с морфологией протяжённых радиокомпонент типа “Double-Double” в популяции гигантских радиоисточников свидетельствует о примерно на порядок большем времени их жизни относительно радиоисточников нормального размера. Из этого факта, а также из равенства пространственных плотностей близких ($z < 0.1$) гигантских радиоисточников и радиоисточников Fanaroff-Riley типа II ($P_{1, АГГ\gamma} > 10^{25} \text{ Bm/Гц}$) получен вывод о том, что $\approx 10\%$ радиоисточников типа Fanaroff-Riley II могут иметь на порядок большие времена жизни и со временем эволюционировать в гигантские. В рамках альтернативной к “Унифицированной Схеме” эволюционной схемы предложена интерпретация наблюдаемого относительного числа квазаров в популяции гигантских радиоисточников ($\sim 10\%$), предполагающая существование долгоживущей популяции радиогромких квазаров, составляющих $\sim 10\%$ от всех радиогромких квазаров. Такая популяция долгоживущих радио громких квазаров может являться родительской популяцией для гигантских радиогалактик.
5. Впервые проведено статистическое исследование эффекта воздействия радиовыброса из АЯГ на ближайшие к ним (проекционное удаление < 150 кпк, относительная лучевая скорость < 600 км/с) галактики. Были использованы каталоги SDSS и FIRST для поиска спектроскопически близких пар галактик и для составления выборки пар содержащих и не содержащих АЯГ-радиоисточник. Получена оценка величины предсказываемого эффекта, составляющая $\sim 5\%$ для самых тесных (проекционное удаление ~ 30 кпк) пар, падающая с увеличением удаления между компаньонами. Наблюдаемая разность частот

обнаружения активности (в особенности звездообразования - ЗО) между парами, содержащими и не содержащими АЯГ-радиоисточник, по величине и характеру зависимости от удаления совпадает с предсказываемой. Большие ошибки, обусловленные малым объемом выборки пар с АЯГ-радиоисточником, не позволяют утверждать о наблюдении эффекта радиоиндуцированной активности. Представлены примеры конкретных пар-кандидатов на роль объектов, демонстрирующих эффект радиоиндуцированной активности (так называемые, “объекты Минковского”).

6. Ядра радиоисточников (ультракомпактные радиоисточники), наблюдаемые на наземных РСДБ-сетях с разрешением \sim миллисекунд дуги, по-видимому, не могут быть использованы в качестве “стандартных линеек” в космологическом тесте “угловой размер - красное смещение”, по крайней мере, для наземных баз. Корреляция “светимость - линейный размер”, обнаруживаемая многими авторами для РСДБ-выборок радиоисточников, в противоположность похожей корреляции для радиогалактик и квазаров на угловых масштабах \sim секунд дуги, может являться следствием инструментальных эффектов.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, 3 глав и Заключения, содержит 47 рисунков, 3 таблицы и библиографию из 261 наименований. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, из них Содержание - 20 стр., Введение – 23 стр., Список литературы – 19 стр.

Содержание диссертации

Во **Введении** кратко представлены основные типы Активных Ядер Галактик (АЯГ), их наблюдательные проявления, основные свойства и их дихотомии (такие как радиогромкость, тип Fanaroff-Riley (Fanaroff & Riley

1974), тип наблюдаемых в оптическом спектре объекта эмиссионных линий). Рассмотрена “Унифицированная Схема” (Urry & Padovani 1995) и место в ней радиогалактик и радиогромких квазаров. Рассмотрены гигантские радиоисточники: история их обнаружения, возможные причины формирования и научная ценность исследования объектов этого класса. Приведены наблюдаемые примеры индуцированной активности. Ставится задача обнаружения эффекта *радиоиндуцированной* активности. Рассмотрена проблема поиска “космологических линеек” и возможные кандидаты на их роль в радиодиапазоне.

В **Разделе 1.1** перечисляются общие свойства объектов класса гигантских радиоисточников и некоторые следствия из них. Так, рассмотрена доля объектов с широкими линиями излучения среди гигантских радиоисточников со спектрами высокого возбуждения, которая оказывается такой же, как и для изотропных выборок радиоисточников (Willott и др. 2000) (выборок, составленных по низкочастотному (~100 МГц) потоку радиоизлучения). В рамках “Унифицированной Схемы” это свидетельствует об изотропном распределении углов радиовыбросов гигантских радиоисточников к лучу зрения. То есть, радиоисточники гигантского размера не являются популяцией объектов с радиовыбросами в плоскости неба.

Раздел 1.2 посвящен рассмотрению асимметрий протяженных радиокомпонент гигантских радиоисточников и сравнению ее с асимметрией протяженных радиокомпонент радиоисточников нормального размера. По распределению различных параметров асимметрии протяженных радиокомпонент (таких как отношение проекционных длин выбросов, угол отклонения выбросов от коллинеарной структуры) гигантские радиоисточники не отличаются от радиоисточников нормального размера. Однако, как показано, причины их формирования у гигантских радиоисточников и радиоисточников нормального размера различны.

Рассмотрены несколько причин формирования асимметрий протяженных радиокомпонент: модель асимметричных инъекций (так называемая “flip-flop” модель, или модель “перекидного рубильника”) (Rudnick 1981), модель геометрического запаздывания (Ryle & Longair 1967) и модель “гауссовых” отклонений (Rudnick & Edgar 1984). Первая

модель предсказывает избыток очень асимметричных и недостаток очень симметричных объектов среди рассматриваемой выборки гигантских радиоисточников. Модель “гауссовых” отклонений в целом хорошо описывает распределение асимметрий гигантских радиоисточников, что может быть связано с большим числом факторов, определяющих величину асимметрии для конкретного объекта, например, как в случае влияния неоднородностей внешней среды. Наконец, модель геометрического запаздывания предсказывает относительно большие скорости распространения выбросов гигантских радиоисточников в межгалактической среде. Однако, рассмотрение распределений асимметрий протяженных радиокомпонент гигантских радиогалактик и квазаров не обнаруживает их различия, которое являлось бы подтверждением модели геометрического запаздывания. В рамках “Унифицированной Схемы” отсутствие значимых различий в распределении асимметрии протяженных радиокомпонент гигантских радиогалактик и квазаров означает, что запаздывание не является определяющим механизмом формирования асимметрии гигантских радиоисточников. Таким образом, преобладающую роль в их возникновении играют неоднородности внешней среды (МГС).

В **Разделе 1.3** рассмотрены возможные причины формирования относительно больших размеров гигантских радиоисточников. Одной из таких причин может являться большая мощность выброса и, как следствие, большая скорость его распространения в МГС. Показано, что имеющиеся в литературе данные РСДБ-наблюдений гигантских радиоисточников согласуются с мощностью их выбросов, сопоставимой с мощностями выбросов радиогалактик и квазаров нормального размера. Таким образом, вряд ли выдающиеся размеры гигантских радиоисточников обусловлены большими мощностями их выбросов.

Исследован вопрос о возможной низкой плотности внешней газовой среды как причине формирования гигантских радиоисточников. Для этого проведена оценка богатства локального (~500 кпк) оптического окружения выборки гигантских радиоисточников по данным спектроскопического обзора SDSS и каталога APM (MacMahon & Irwin 1992). Проведены как прямые подсчеты спектроскопически близких галактик, так и оценки амплитуд двухточечной корреляционной функции (КФ). На основе этих

данных показано, что по богатству и характеру окружения гигантские радиоисточники не отличаются от радиоисточников нормального размера. Хозяйские галактики гигантских радиоисточников встречаются как практически изолированными, так и в скоплениях вплоть до богатства класса I по Эйблу. Это противоречит точке зрения о том, что низкая плотность внешней среды является единственной причиной формирования гигантских радиоисточников.

Наконец, рассмотрена гипотеза о наличии популяции долгоживущих радиоисточников как родительской популяции для гигантских радиоисточников. Для оценки объема гипотетической популяции радиоисточников и времени жизни ее объектов проводится оценка пространственной плотности гигантских радиоисточников по данным обзора WENSS (Simpson и др. 1996) в области $z < 0.1$. Полученная оценка совпадает с объемной плотностью числа близких радиогалактик Fanaroff-Riley типа II. Далее оценивается величина отношения среднего времени жизни гигантских радиоисточников к среднему времени жизни радиоисточников Fanaroff-Riley типа II в стадии радиоисточника нормального размера. Для этого используется предположение о том, что морфология протяженных радиокомпонент типа “Double-Double” в некоторых радиоисточников связана с прерывающейся активностью выброса. Если характерный временной масштаб, в течение которого возможно прерывание, одинаков для гигантских и нормальных радиоисточников, то из относительного числа объектов типа “Double-Double” в обеих популяциях можно оценить отношение времен жизни гигантских радиоисточников и радиоисточников нормального размера. Полученная величина (~ 10), вместе с равенством пространственных плотностей близких ($z < 0.1$) гигантских радиоисточников и радиоисточников Fanaroff-Riley типа II, указывает на то, что $\approx 10\%$ радиоисточников Fanaroff-Riley типа II имеют на порядок большие времена жизни и эволюционируют в гигантские. При этом характерный временной масштаб составляет $\sim 10^9$ лет, что совпадает с временным масштабом мерджинга галактик, связанным с действием динамического трения (Fogman и др. 2009). Это, в свою очередь, подтверждает предположение о причине возникновения морфологий протяженных радиокомпонент типа “Double-Double” как прерыванием “работы” выброса

в связи с гравитационно-приливным взаимодействием сливающегося компаньона.

В **Разделе 1.4** показано значительное влияние эффектов селекции на исследуемые выборки гигантских радиоисточников. Для этого использована эволюционирующая функция радиосветимости и оценена пространственная плотность гигантских радиоисточников на $z \sim 0.6$, которая оказывается на порядок меньше наблюдаемой.

В **Разделе 1.5** рассмотрена использовавшаяся в работе процедура оценки богатства окружения хозяйской галактики радиоисточника путем подсчета амплитуды кросс-корреляционной функции.

В **Разделе 2.1** представлены критерии выборки близких пар галактик, а также методы отождествления оптического АЯГ и АЯГ-радиоисточника. Для отождествления оптического АЯГ использовался метод диаграмм Baldwin-Phillips-Terlevich (BPT-диаграмм) (Baldwin и др. 1981). Для выделения АЯГ с радиоисточником использовался метод разделения радиоисточников на плоскости $D_n(4000) - \log(P_{1.4GHz}/M_* [Bm/G\mu \cdot M_\odot])$ (где $D_n(4000)$ – амплитуда скачка вблизи 4000\AA , $P_{1.4GHz}$ – радиомощность, M_* – звездная масса галактики (Best и др. 2005). Для “калибровки” метода на данную плоскость были нанесены галактики, радиоизлучение которых обусловлено исключительно процессом звездообразования (З0) и исключительно активностью ядра (радио-АЯГ).

Раздел 2.2 посвящен исследованию компаньонов пар выборок на предмет различия свойств (величин масс и отношений масс, богатства окружения и морфологических типов) выборки пар с АЯГ-радиоисточником и выборки сравнения. Для этого рассматриваются только пары с массами компаньона раннего типа (обозначаемого в работе как компаньон ≥ 1) $\log M_* [M_\odot] > 11.125$. Показано, что распределения отношений масс, а так же морфологических типов компаньонов, исследуемых на величину активности (обозначаемых в работе как ≥ 2), не отличаются. Пары с радиоисточником населяют слегка более плотное окружение, однако, как показано, это не может повлиять на анализ возможной радио-индуцированной активности.

В **Разделе 2.3** оценивается предполагаемая величина эффекта радио-индуцированной активности, а затем полученные частоты встречаемости

активных галактик (со вспышкой ЗО или АЯГ) сравниваются между собой в различных диапазонах проекционных удалений. Делаются выводы относительно роли исследуемого эффекта в формировании активности. Получена ожидаемая оценка разности частот активности в парах с радиоисточником и без радиоисточника, составляющая $\approx 5\%$ для удалений компаньонов ≈ 25 кпк, падающая с увеличением удаления. Наблюдаемые данные совпадают как по величине, так и по зависимости от удаления с теоретически предсказанными оценками. Тем не менее, статистическая значимость результата (не более 1.5σ), связанная с малым объемом выборки пар с наименьшими удалениями, не позволяет утверждать об обнаружении эффекта радио-индуцированной активности.

В **Разделе 2.4** представлены радио (взятые из каталогов FIRST и NVSS) и оптические (из обзора SDSS) изображения пар, возможно демонстрирующих эффект радио-индуцированной активности.

В **Разделе 3.1** кратко представлены результаты использования наблюдаемых на РСДБ-сетях компактных и ультракомпактных радиоисточников в космологическом тесте “угловой размер - красное смещение”, выводы из них и возникающие вопросы. Далее, в **Разделе 3.2**, мы используем РСДБ-выборку ~ 200 радиоисточников, наблюдаемых на VLBA на частоте 15 ГГц (Kovalev и др. 2005) для проведения рассматриваемого космологического теста. Показывается, что использование в соотношении “ θ - z ” углового размера РСДБ-ядра радиоисточника, полученного в результате моделирования функции видности или распределения полной интенсивности гауссовыми компонентами (или использование так называемого параметра компактности) может индуцировать наблюдаемую корреляцию “светимость - линейный размер”, отмечаемую многими авторами и рассматриваемую некоторыми из них как проявление физических свойств радиоисточников. Так же рассмотрена выборка ~ 300 радиоисточников из работы (Gurvits 1994), использующей компактность Γ для определения характерного углового размера, в которой также наблюдается подобный эффект. В **Разделе 3.3**, на простом примере показано, что, вопреки часто встречающейся точке зрения, частотный сдвиг спектра радиоисточника в связи с релятивистским объемным движением вещества выброса может

сверхкомпенсировать частотный сдвиг, возникающий в результате космологического красного смещения объекта.

Наконец, в **Заключении** перечислены основные выводы и результаты диссертации, выносимые на защиту.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации содержатся в следующих научных публикациях (в том числе рецензируемых из списка ВАК):

1. Комберг, Б.В. и Пашенко, И.Н. *Гигантские радиогалактики – старые долгоживущие квазары?* // АЖ, 2009, том 86, №12, стр. 1163-1178, e-print: arXiv:0901.3721 [astro-ph]
2. Пашенко, И.Н. и Витрищак В.М. *Радио-индуцированная активность в парах галактик.* // АЖ, 2010, том 87, №2, стр. 1-16.
3. Пашенко, И.Н. и Витрищак В.М. *Использование ультракомпактных радиоисточников в космологическом тесте “угловой размер - красное смещение”.* // препринт ФИАН, 2011, №5; АЖ, 2011, том 88 №4, в печати

Личный вклад автора в совместные работы

Все работы, приведенные в списке публикаций по теме диссертации, были выполнены в соавторстве. Однако вклад автора диссертации во все работы составляет не менее 2/3.

Список литературы

1. **Abell, G.O.** *The Distribution of Rich Clusters of Galaxies.* // ApJS, 1958, том 263, стр. 211-288

2. **Allen, S.W., Dunn, R.J.H., et al.** *The Relation between Accretion Rate and Jet Power in Elliptical Galaxies.* // MNRAS, 2006, том 372, с.тр. 21-30
3. **Baldwin, J.A., Phillips, M.M., and Terlevich, R.** *Classification Parameters for the Emission-line Spectra of Extragalactic Objects.* // PASP, 1981, том 93, с.тр. 5-19
4. **Becker, R.H., White, R.L. and Helfand, D.J.** *The VLA's FIRST Survey.* // ASP Conf. Ser., 1994, том 61, с.тр. 165-174
5. **Best, P.N., Kauffmann, G., et al.** *A Sample of Radio-Loud Active Galactic Nuclei in the Sloan Digital Sky Survey.* // MNRAS, 2005, том 362, с.тр. 9-24
6. **Blundell, K., Rawlings, S., Willot, C.J.** *The Nature and Evolution of Classical Double Radio Sources from Complete Samples.* // AJ, 1999, том 117, с.тр. 677-706
7. **Colafrancesco, MNRAS,** 2008, том 385, с.тр. 2041
8. **Chambers, K.C., Miley, G.K., and van Breugel, W.** *Alignment of Radio and Optical Orientations in High-Redshift Radio Galaxies.* // Nature, 1987, том 329, с.тр. 604-606
9. **Churazov, E., Brüggén, M., et al.** *Evolution of Buoyant Bubbles in M87.* // ApJ, 2001, том 554, с.тр. 261-273
10. **Condon, J.J., Cotton, W.D., et al.** *The NRAO VLA Sky Survey.* // AJ, 1998, том 115, с.тр. 1693-1716
11. **Croft, S., van Breugel, W., De Vries, W., et al.** *Minkowski's Object: a Starburst Triggered by a Radio Jet, Revisited* // ApJ, 2006, том 647, с.тр. 1040-1055
12. **Dey, A., van Breugel, W., et al.** *Triggered Star Formation in a Massive Galaxy at $Z=3.8$: 4C 41.17* // ApJ, 1997, том 490, с.тр. 698-711
13. **Dunn, R.J.H., Fabian, A.C., and Taylor, G.B.** *Radio Bubbles in Clusters of Galaxies.* // MNRAS, 2005, том 364, с.тр. 1343-1353
14. **Evans, D.A., Fong, W.-F., et al.** *A Radio through X-Ray Study of the Jet/Companion-Galaxy Interaction in 3C 321.* // ApJ, 2008, том 675, с.тр. 1057-1066

15. **Fanaroff, B.L., Riley, J.M.** *The Morphology of Extragalactic Radio Sources of High and Low Luminosity.* // MNRAS, 1974, том 167, стр. 31-36
16. **Foreman, G., Volonteri, M., and Dotti, M.** *Double Quasars: Probes of Black Hole Scaling Relationships and Merging Scenarios.* // ApJ, 2009, том 693, стр. 1554-1562
17. **Fragile, P.C., Murray, S.D., et al.** *Radiative Shock-Induced Collapse of Intergalactic Clouds.* // ApJ, 2004, том 604, стр. 74-87
18. **Gopal-Krishna, Wiita, P.J., and Osterman, M.A.** *Radio Galaxies and the Star Formation History of the Universe.* // ASP Conf. Ser., 2003, том 290, стр. 319-322
19. **Gurvits, L.I.** *Apparent Milliarcsecond Sizes of Active Galactic Nuclei and the Geometry of the Universe.* // ApJ, 1994, том 425, стр. 442-449
20. **Gurvits, L.I., Kellermann, K.I., Frey, S.** *The “Angular Size – Redshift” Relation for Compact Radio Structures in Quasars and Radio Galaxies.* // Astron.Astrophys., 1999, том. 342, стр. 378-388
21. **Heinz, S., Churazov, E.** *Heating the Bubbly Gas of Galaxy Clusters with Weak Shocks and Sound Waves.* // ApJ, 2005, том 634, стр. 141
22. **Hoyle, F.** *The Relation of Radio Astronomy to Cosmology.* // Труды симпозиума IAU Symp. №9 and USRI Symp. №1, Paris Symp. On Radio Astronomy, IAU Symposium №9, 1959, ed. R.N. Bracewell (Stanford: Stanford Univ. Press), стр. 529-532
23. **M. Jamrozy, U. Klein, J. Machalski, and K.-H. Mack** *Large-Scale Radio Structure in the Universe: Giant Radio Galaxies.* // e-print:arXiv:astro-ph/0404073, 2004
24. **Jackson, J.C.** *Is There a Standard Measuring Rod in the Universe.* // MNRAS Letters, 2008, том. 390, стр. L1-L5
25. **Kapahi, V.K.** *Redshift and Luminosity Dependence of the Linear Sizes of Powerful Radio Galaxies.* // Astron. J., 1989, том 97, стр. 1-9
26. **Kellermann, K.** *The Cosmological Deceleration Parameter Estimated From the Angular-Size/Redshift relation for Compact Radio Sources.* // Nature, 1993, том. 361, стр. 134-136
27. **Kessler, R., Becker, A.C., Cinabro, D., et al.** *First-Year Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters.* // The Astrophys. J. Suppl., 2009, том 185, стр. 32-84

28. **King, A.** *The AGN-Starburst Connection, Galactic Superwinds, and $M_{BH} - \sigma$.* // ApJ, 2005, том 635, стр. L121-L123
29. **Kovalev, Y.Y., Kellerman, K.I., Lister, M.L., et al.** *Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine Scale Structure.* // AJ, 2005, том 130, стр. 2473-2505
30. **Legg, T.H.** *Redshift and the Size of Double Radio Sources.* // Nature, 1970, том 226, стр. 65-67
31. **Machalski, J., Chyzy, K.T., and Jamrozy, M.** *On the Time Evolution of Giant Radio Galaxies.* // e-Print arXiv:astro-ph/0210546v1, 2002
32. **Mack, K.H., Klein, U., et al.** *Spectral Indices, Particle Ages, and the Ambient Medium of Giant Radio Sources.* // A&A, 1998, том 329, стр. 431-442
33. **McCarthy, P.J., van Breugel, W., et al.** *A Correlation between the Radio and Optical Morphologies of Distant 3CR Radio Galaxies.* // ApJ, 1987, том 321, стр. L29-L33 (1987)
34. **MacMahon, R.G., and Irwin, M.J.** *APM Surveys for High-Redshift Quasars.* // in: *Digitised Optical Sky Surveys*, eds H. T. Mac Gillivray and E. B. Thomson (Dordrecht: Kluwer, 1992), стр. 417
35. **Miley, G.K.** *Variation of the Angular Sizes of Quasars with Redshift.* // Nature, 1968, том 218, стр. 933-934
36. **Minkowski, R.** *The Problem of the Identification of Extragalactic Radio Sources.* // ASP Conf. Ser., 1958, том 70, стр. 143-151
37. **Nilsson, K., Valtonen, et al.** *On the Redshift-Apparent Size Diagram of Double Radio Sources.* // ApJ, 1993, том 413, стр. 453-476
38. **Rees, M.J.** *The radio/optical alignment of high- z radio galaxies - Triggering of star formation in radio lobes.* // MNRAS, 1989, том 239, стр. 1-4
39. **Reynolds, C.S., Heinz, S., and Begelman, M.C.** *The hydrodynamics of dead radio galaxies.* // MNRAS, 2002, том 332, стр. 271-282
40. **Rudnick, L.** *Nuclear ejection - One side at a time.* // труды симпозиума Extragalactic radio sources, Proc. IAU Symp. №97, Albuquerque, N. M., August 3-7, 1981, eds D. S. Heesch and C. M. Wide (Dordrecht: Reidel, 1982), стр. 47-49
41. **Rudnick, L. Edgar, B.K.** *Alternating-side ejection in extragalactic radio sources.* // ApJ, 1984, том 279, стр. 74-85

42. **Ryle, M., Sir, Longair, M.S.** *A possible method for investigating the evolution of radio galaxies.* // MNRAS, 1967, том 136, стр. 123-140
43. **Sabrahmanyam, R., Saripalli, L., and Hunstead, R.W.** *Morphologies in megaparsec-size powerful radio galaxies.* // MNRAS, 1996, том 279, стр. 257-274
44. **Saikia, D.J., Konar, C., and Kulkarni, V.K.** J0041+3224: *a new double-double radio galaxy.* // MNRAS, 2006, том 366, стр. 1391-1398
45. **Saripalli, L., Hunstead, R.W., et al.** *A Complete Sample of Megaparsec-sized Double Radio Sources from the Sydney University Molonglo Sky Survey.* // AJ, 2005, том 130, стр. 896-922
46. **Simkin, S. M.** *Optical Properties of the Radio Source PKS 0123-01 (3C 40) in Abell 194.* // ApJ, 1976, том 204, стр. 251-258
47. **Simpson, C., Ward, M., et al.** *Emission-line ratios in a radio-selected sample of active galactic nuclei.* // MNRAS, 1996, том 281, стр. 509-521
48. **Singal, A.K.** *Cosmic Evolution and Luminosity Dependence of the Physical Sizes of Powerful Radio Galaxies and Quasars.* // MNRAS, 1993, том 263, стр. 139-148
49. **Umemura, M.** *The Growth of Supermassive Black Holes and QSO Formation* // труды конференции Coevolution of Black Holes and Galaxies, Carnegie Observatories Centennial Symposia, ed. L. C. Ho, Carnegie Observ. Astrophys. Ser. (Pasadena: Carnegie Observatories, 2004)
50. **Urry, M.C., Padovani, P.** *Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei.* // PASP, 1995, том 107, стр. 803-845
51. **Vermeulen, R.C., Cohen, M.H.** *Superluminal motion statistics and cosmology.* // ApJ, 1994, том 430, стр. 467-494
52. **Wilcots, E.M.** *The Evolution of the Gas Content of Galaxy Groups.* // Astronomische Nachrichten, 2009, том 330, стр. 1059-1063
53. **Willis, A.G., Strom, R.G., and Wilson, A.S.** *3C236, DA240; the largest radio sources known* // Nature, 1974, том 250, стр. 625-630
54. **Willott, C.J., Rawlings, S., and Blundell, K.M.** *The 7C Redshift Survey - Understanding Radio-loud Quasars and Radio Galaxies* // ASP Conf. Ser., 1999, том 162, стр. 135-146

55. **Willott, C.J., Rawlings, S., et al.** *The quasar fraction in low-frequency-selected complete samples and implications for unified schemes.* // MNRAS, 2000, том 316, стр. 449-458
56. **York, D.G., Adelman, J., et al.** *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary.* // AJ, 2000, том 120, стр. 1579-1587