

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

**Нохрина Елена Евгеньевна**

**Методы оценки физических параметров релятивистских  
струйных выбросов из активных ядер галактик на основе  
аналитического моделирования и наблюдений**

Специальность 01.03.02 —  
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты: **Барков Максим Владимирович**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник

**Блинные Сергей Иванович**,  
доктор физико-математических наук,  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики,  
главный научный сотрудник

**Докучаев Вячеслав Иванович**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 28 сентября 2022 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707 (АКЦ ФИАН).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет». Заверенные отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д 002.023.01.

Автореферат розослан \_\_\_\_\_ июня 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.023.01,  
канд. физ.-мат. наук

Шахворостова Надежда Николаевна

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы и степень ее разработанности

Активные ядра галактик (АЯГ) доминирует в излучении практически во всех диапазонах электромагнитного спектра. Наблюдаемые высокие мощности, демонстрируемые АЯГ, объясняются эффективным механизмом аккреции вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД), находящуюся в центрах таких галактик. Самым ярким проявлением активности является наличие хорошо сколламированного выброса плазмы, распространяющегося с релятивистскими скоростями, — релятивистского струйного выброса (джета).

В настоящий момент магнитогидродинамическая (МГД) модель активности компактных объектов является общепринятой [1]. В ее основе лежит идея сверхмассивной Керровской черной дыры, погруженной в регулярное магнитное поле, предположительно создаваемое и/или принесенное аккреционным диском [2; 3]. При этом появляется индуцированное электрическое поле и ток, создающий тороидальное магнитное поле и поток вектора Пойнтинга, который, как считается, играет основную роль в переносе энергии у основания выброса. При этом по мере распространения джета происходит ускорение плазмы и трансформация энергии электромагнитного поля в кинетическую энергию частиц. Такая МГД модель успешно объясняет многие процессы в АЯГ.

В рамках этого подхода была успешно применена модель синхротронного излучения с самопоглощением плазмы в магнитном поле для объяснения наблюдений в радиодиапазоне [4—7]. В частности, исследована связь наблюдаемой плотности потока с параметрами излучающей области [5], проведено теоретическое и аналитическое исследование поляризации излучения [5; 7]. Предложены модели, объясняющие наблюдаемые на тот момент ограничения в измеренной яркостной температуре [4; 6]. Позже именно эти работы легли в основу метода оценки магнитного поля и концентрации плазмы в выбросах по данным измерений видимого сдвига ядра [8], где существенным предположением является предположение о равномерном распределении плотностей энергий магнитного поля и излучающей плазмы [5; 6].

Исследование структуры выбросов проводилось как аналитически, так и численно. Были исследованы условия эффективного ускорения плазмы в джетах. Показано, что в монопольном магнитном поле ускорение плазмы происходит неэффективно, а выброс остается сильно замагниченным на сколь угодно далеких расстояниях [9]. При этом эффективное ускорение возможно на магнитных поверхностях вблизи оси джета при условии их дифференциального уплотнения [10]. Для различных форм границ выбросов показано, что эффективное ускорение плазмы возможно в хорошо сколламированных течениях [9—15]. В частности, аналитически [16—18] и численно [10; 11; 19] было показано наличие плотного кора для достаточной большого давления внешней среды. Первые аналитические и численные результаты по изменению формы границы выброса получены непосредственно в [14] и через изменение характера давления в джете

при его распространении в работах [13; 20]. Эти успехи связаны как с формулировкой теории, позволяющей относительно просто описывать явление АЯГ [21; 22], так и с бурным развитием численного моделирования [10; 11; 19; 23].

Одновременно, исследования релятивистских струйных выбросов методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) позволили сильно продвинуться в понимании физических условий в джетах. Измерения частотно-зависимого сдвига ядра [5; 24; 25] дали инструмент оценки величин магнитного поля и концентрации плазмы в джетах [8; 26; 27], и были использованы для оценки магнитного потока выбросов и состояния аккреционного диска [28]. Измерения яркостной температуры дали возможность независимой оценки величины магнитного поля [29], а результаты наземно-космического телескопа “Радиоастрон” дали указания на возможное неравновесное состояние плазмы в излучающей области [6]. Исследование кинематики джетов [30—34] дали информацию о величинах характерных скоростей в выбросах и о систематике в их ускорениях, а карты скоростей поперек выброса [35] показали их ярко выраженную поперечную структуру. Исследование форм выбросов в ближайших источниках [36—47], в том числе с применением метода стачковых карт к анализу изображений джетов [48], открыло новое явление — изменение формы выбросов с параболической на коническую, что может быть универсальным свойством всех джетов [A1].

Методы оценки параметров активных ядер галактик, как правило, опираются на теоретические модели выбросов и механизмов их запуска. Широко используемый в настоящий момент метод измерения сдвига ядра [24] для оценки величины магнитного поля [8] основан на модели Блэндфорда–Кенигла [5] и использует предположение о равномерном распределении [5; 6]. С другой стороны, предположение о наличии в окрестности черной дыры динамически важного магнитного поля [19; 28; 49—52] дает возможность оценивать величину магнитного поля по данным наблюдений светимости аккреционного диска (см., например, [28]) или темпу аккреции [19]. Для источников с яркостной температурой, не превышающей предел равномерного распределения, также предложен метод оценки величины магнитного поля [29].

Оценки масс черных дыр важны для определения большинства параметров АЯГ. Самыми надежными и модельно независимыми являются оценки по кинематике газа, звезд или шаровых скоплений (см. [53] и ссылки в этой работе). Еще один метод оценки масс ЧД в АЯГ основан на методе реверберационного картографирования, когда скорость движения в области формирования широких линий оцениваются по ширине линий, а размер этой области — по запаздыванию переменности в светимости диска и в линиях (см., например, [54; 55]). Менее точным, но применимым к большому числу АЯГ, является метод, в котором размер области формирования широких линий связывается со светимостью в линиях [53; 56]. На этом предположении основаны оценки масс в работах [57; 58].

Давление внешней среды, играющей, видимо, ключевую роль в удержании выбросов [11; 13—15; 20; 59; 60] было измерено с помощью наблюдений в

рентгеновском диапазоне лишь для нескольких АЯГ [61—63] на расстояниях в несколько сотен парсек от черной дыры. С теоретической точки зрения, поведение давления внешней среды рассматривалось в рамках модели сферически симметричной аккреции Бонди [64—66] или в связи с течением с диска [60].

**Целями** настоящей работы является оценка ключевых параметров активных ядер галактик. В частности:

- уточнение методов оценки параметров с помощью результатов аналитического моделирования в рамках идеальной магнитной гидродинамики;
- оценка давления внешней среды, необходимого для коллимации и удержания струйных выбросов;
- оценка ключевых физических параметров центральной машины, определяющих ее активность;
- оценка ключевых параметров струйного выброса, определяющих его основные свойства;
- проверка результатов аналитического моделирования по данным наблюдений.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

- Разработать метод оценки параметров множественности и замагниченности по наблюдательным данным. По данным измерений видимого сдвига ядра определить распределение АЯГ по начальной замагниченности течения и определить характерную величину параметра множественности.
- Исследовать причинную связность джетов с границей различной формы.
- Разработать метод оценки параметров (замагниченность, величина магнитного поля и концентрация плазмы) источников, демонстрирующих экстремальную величину яркостной температуры. Так как излучающая область таких источников находится в состоянии, далеком от энергетического равнораспределения, то необходимо решить задачу без стандартного предположения о равнораспределении и привлечь к оценкам параметров данные дополнительных измерений.
- Исследовать влияние неоднородности релятивистского струйного выброса на оценку величины магнитного поля по яркостной температуре.
- Используя модель неоднородной структуры выброса, предложить метод оценки полного магнитного потока в выбросах — одного из ключевых параметров, определяющих мощность джетов.
- По данным измерений видимого сдвига ядра и яркостной температуры оценить магнитный поток для данной выборки источников. Провести сравнение мощности джета, определенного по величине магнитного потока, со средней мощностью джета. По результатам сравнения оценок магнитного потока с его значениями для магнитоарестованного диска, исследовать возможное состояние дисков в выборке источников.

- Исследовать влияние вторичной плазмы, образующейся в результате двухфотонной конверсии, на динамику релятивистского струйного выброса. Исследовать роль нагружения массой и нагружения зарядами в процессах локального ускорения и торможения джетов. Провести оценки светимостей, необходимых для объяснения наблюдаемых ускорений.
- Исследовать роль конечной температуры в модели джета с замкнутым электрическим током. Показать связь изменения геометрии выброса с переходом течения от сильно к слабо замагниченному режиму. Исследовать возможные кинематические признаки наличия излома.
- Используя связь геометрии выброса в изломе с его внутренними характеристиками, предложить метод оценки ключевых параметров джета, черной дыры и внешней среды (радиуса светового цилиндра, спина черной дыры, полного магнитного потока, мощности выброса и величины давления внешней среды). Провести оценки этих параметров для источников с обнаруженным изломом.
- Предложить новый метод оценки масс черных дыр в АЯГ с изменением геометрии джета с точностью до одного порядка величины.
- Для наиболее хорошо исследованной галактики М87 воспроизвести форму выброса и на основании этого моделирования независимо определить спин, массу, магнитный поток и мощность выброса. В том числе определить состояние диска и сравнить результаты с результатами наблюдений и моделирования Телескопа Горизонта Событий.
- Предложить неявный метод оценки формы выбросов в далеких источниках по результатам моделирования и данным наблюдений. Оценить влияние параболической формы на показатель степени частотно-зависимого видимого сдвига ядра.

### **Научная новизна**

работы заключается в разработке новых методов определения параметров черной дыры, релятивистского выброса и внешней среды в активных ядрах галактик с помощью аналитического моделирования и данных наблюдений. В частности, впервые на основе измерений частотно-зависимого сдвига ядра проведена оценка максимально возможного фактора Лоренца джета для выборки из сотни источников и оценка параметра множественности, что позволило сделать выбор между двумя моделями рождения плазмы. Впервые показана необходимость учета поперечной неоднородности выброса при оценке физических величин по измерениям яркостной температуры. Учет модельных поперечных профилей физических величин в выбросах позволили надежно связать оценки магнитного поля на парсековых масштабах с величиной магнитного потока у основания выброса. Впервые исследовано влияние нагружения зарядами на динамику нагруженных частей джетов. Для определения параметров выбросов впервые применена связь изменения геометрии выброса с переходом течения от сильно замагниченному к слабо замагниченному течению. Предложен метод

оценки спинов и масс черных дыр и давления внешней среды. Для ближайшего АЯГ — М87 — с большим количеством наблюдательных данных впервые получена оценка спина черной дыры, полного магнитного потока в джете и определено состояние диска по моделированию формы джета. Впервые предложен неявный метод оценки формы основания струйных выбросов для далеких источников с измеренным сдвигом ядра и скоростью плазмы, определенной по запаздыванию вспышек в ядрах.

### **Теоретическая и практическая значимость**

этой работы заключается в разработке новых методов исследования природы активности релятивистских струйных выбросов в ядрах галактик и в получении оценок физических параметров этих источников. Связь геометрии выброса с режимом течения дает новый инструмент для оценки параметров черной дыры, выброса и внешней среды. На основе методов оценки спинов черных дыр уже запланированы дальнейшие исследования на большей выборке источников с изломом. Предложенные методы оценки параметров по геометрии излома формы выброса уже применяются другими группами в своих исследованиях АЯГ. Ограничения, полученные на значения параметров множественности и замагниченности используются при анализе кинематики выбросов и служат ограничением физических процессов рождения плазмы в основаниях джетов.

### **Методология и методы исследования**

Исследования проводились с помощью аналитического моделирования структуры релятивистских течений в рамках идеальной осесимметричной магнитной гидродинамики, в том числе с учетом конечной температуры и анизотропного давления. Уравнения МГД решались в предположении цилиндрической геометрии, что является адекватным предположением при описании хорошо сколлимированных течений. Для определения ключевых параметров выбросов по результатам моделирования проводился анализ наблюдательных данных, опубликованных в вышедших статьях и каталогах. Полученные результаты анализировались с применением статистических методов, в том числе оценки значимости и достоверности корреляций и применения метода бутстрэппинга для определения излома в данных формы границы из галактики М87.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Предложен метод оценки начальной замагниченности течения  $\sigma_M$  и параметра множественности  $\lambda$  по измерениям видимого сдвига ядра. По результатам анализа величин сдвигов ядер для выборки из 97 источников получены распределения источников по параметрам замагниченности и множественности. Показано, что максимальные факторы Лоренца течения плазмы в большинстве источников выборки должны иметь значения в пределах 20 — 50. Полученная характерная величина  $\sim 10^{12} - 10^{15}$  параметра множественности позволяет выдвинуть аргумент в пользу модели рождения электрон-позитронных пар в результате двухфотонной конверсии в магнитосфере черной дыры.

2. Предложен метод оценки величины магнитного поля, концентрации плазмы и локальной замагниченности в рамках модели однородного джета по измерениям яркостной температуры и видимого сдвига ядра. Показано, что при оценке параметров источников с наблюдаемой яркостной температурой, превышающей равновесное значение, важен учет поперечной неоднородности выброса. Получено выражение для оценки магнитного поля по яркостной температуре в рамках модели неоднородного джета. Предложен метод оценки полного магнитного потока в струйном выбросе по данным измерений видимого сдвига ядра и яркостной температуры. Для выборки из 48 источников показано, что для большинства из них, их средняя мощность может быть объяснена механизмом Блэндфорда–Знайека. Полученные оценки магнитного потока в источниках хорошо согласуются с моделью диска с нормальной эволюцией.
3. Исследованы эффекты нагружения джетов электрон-позитронной плазмой в результате двухфотонной конверсии. Впервые исследовано влияние нагружения джета зарядами. Получены выражения для внутренней энергии и анизотропного давления вторичной плазмы. Показано, что нагружение массой локально способно замедлять выброс. Нагружение джета зарядами возмущает электрическое и магнитное поля в джете и способно как локально замедлять, так и ускорять плазму. Этот процесс может играть важную роль в развитии неустойчивостей во внешних частях джетов.
4. На основе аналитического моделирования с учетом конечной температуры показано, что наблюдаемое в ряде источников изменение формы выброса с параболической на коническую может быть объяснено изменением состояния выброса: переходом джета от сильно замагниченного к слабо замагниченному режиму. По данным измерения ширины джета в изломе и положения излома, предложен метод оценки ключевых параметров активного ядра галактики: радиуса светового цилиндра выброса, спина и массы черной дыры, величины давления внешней среды, удерживающей выброс. Для источников с массами, измеренными методом дисперсии скоростей, величины большинства спинов лежат в интервале  $0.1 - 0.3$ , что хорошо согласуется с моделями запуска джетов и моделями эволюции спинов для близких источников. Для источников с наблюдаемым изломом получены величины давления внешней среды, необходимого для удержания выбросов.
5. Для исследования характерных масштабов положения изломов в выбросах в физических единицах проведен анализ масс черных дыр для выборки из 44 источников. Показано, что массы, полученные с использованием соотношения между размером области формирования широких линий и светимостью в линиях, имеют значимую отрицательную корреляцию с углом наблюдения. Это фактор необходимо

учитывать при оценках данным методом масс черных дыр в близких активных ядрах галактик, так как он может давать заниженные значения. Предложен метод оценки масс черных дыр по измеренной ширине джета в изломе. Показано, что массы, определенные этим методом для источников с обнаруженным изломом, находятся в хорошем согласии с оценками масс по кинематике — одним из наиболее точных методов определения масс черных дыр в АЯГ.

6. Проведено аналитическое моделирование формы границы джета в галактике М87, которое точно воспроизвело форму выброса на масштабах от 1 до  $10^4$  парсек. Получены оценки радиуса светового цилиндра, спина черной дыры  $\sim 0.1 - 0.3$ , полного магнитного потока в выбросе и мощности джета. По данным измерений формы границы, темпа аккреции и величины внешнего давления предложен метод оценки массы черной дыры. Показано, что ожидаемый темп аккреции согласуется с наличием магнитоарестованного диска около черной дыры в М87.
7. На основе аналитического моделирования и использования данных измерения видимого сдвига ядра и характерной скорости плазмы по запаздыванию всплеск, подтверждено наличие параболической части начала джета в далеких источниках, недоступных для прямых измерений формы выброса в силу конечной разрешающей способности инструментов. Вычислен ожидаемый показатель степени для частотно-зависимого видимого сдвига ядра с учетом параболичности. Он находится в хорошем согласии с последними данными наблюдений.

**Достоверность** проведенных исследований подтверждается многократной проверкой результатов моделирования независимыми методами (в том числе численным моделированием [11; 13; 20; 59] и аналитическим моделированием в работах других авторов [14]) и использовании надежных данных наблюдений. Все результаты докладывались и обсуждались на семинарах, конференциях и симпозиумах, и используются другими учеными в своих работах. Некоторые результаты были проверены независимо другими авторами. Полученное в работе [А2] распределение подтверждено более поздними исследованиями кинематики [34]. Получено подтверждение локализации перехода формы джета от параболической к конической далеко внутри сферы Бонди [46; 47], что дополнительно указывает на связь этого явления с внутренними свойствами выброса. Результаты определения параметров выброса в М87 — состояние диска, возможная величина спина черной дыры, ее масса — находятся в хорошем согласии с результатами Телескопа Горизонта Событий [67].

### **Апробация работы**

Исследования, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на семинарах АКЦ ФИАН, научной группы SHERPAS в Институте Планетологии и Астрофизики Гренобля и VLBI группы в Радиоастрономическом Институте Макса Планка. Основные результаты работы были доложены в виде

стендовых, устных и приглашенных докладов на 1 всероссийской и 15 международных конференциях и симпозиумах:

1. “Указания на параболическую форму джетов в далеких АЯГ”, Всероссийская Астрономическая Конференция, Москва, Россия (2021), устный доклад (смешанный формат конференции).
2. “AGN jet boundary shape break — what can we learn about the central engine?”, EAS 2021, Лейден, Нидерланды (2021), устный доклад (удаленный формат конференции).
3. “Evidence for parabolic jet shape in distant AGNs”, Extragalactic jets on all scales — launching, propagation, termination, Гейдельберг, Германия (2021), устный доклад (удаленный формат конференции).
4. “AGN jets magnetic field”, COSPAR 2021, Сидней, Австралия (2021), приглашенный доклад (смешанный формат конференции).
5. “Estimating AGN jet parameters from observations of a jet shape brea”, 30th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Портсмут, Великобритания (2019), устный доклад.
6. “M87 black hole mass and spin estimate through the position of the jet boundary shape brea”, The 3C Extragalactic Radio Sky: Legacy of the Third Cambridge Catalogue, Турин, Италия (2019), устный доклад.
7. “The jet parameters implied by the measured extreme brightness temperatures in BL Lac and 3C273”, eXtreme19, Падуя, Италия (2019), устный доклад.
8. “Оценки физических параметров джетов по излому формы”, Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, Москва, Россия (2018), устный доклад.
9. “The Correlation between Magnetic Flux and Jet Power”, Half a Century of Blazars and Beyond, Турин, Италия (2018), устный доклад.
10. “Estimating AGN jet parameters from observations of a jet shape break”, Half a Century of Blazars and Beyond, Турин, Италия (2018), стендовый доклад.
11. “The Correlation between Magnetic Flux and Jet Power”, IAS Symposium 342 Perseus in Sicily: from black hole to cluster outskirts, Ното, Италия (2018), устный доклад.
12. “The Jet Magnetic Flux”, High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows VI, Москва, Россия (2017), устный доклад.
13. “Non-equipartition plasma parameters”, European Week of Astronomy and Space Science 2017, Прага, Чехия (2017), стендовый доклад.
14. “Physical parameters of jets — non-uniform transversal model”, Quasars at All Cosmic Epochs, Падуя, Италия (2017), устный доклад.
15. “Relativistic jets deceleration — effects of mass-loading”, Second Workshop on Relativistic Plasma Astrophysics, Вест-Лафайет, США (2016), стендовый доклад.

16. Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics, Краков, Польша (2015), стендовый доклад.

### Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 10 научных статьях [A1—A10], опубликованных в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus.

- A1. *Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Nokhrina E. E., Plavin A. V., Beskin V. S., Chernoglazov A. V., Lister M. L., Savolainen T.* A transition from parabolic to conical shape as a common effect in nearby AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Т. 495. — С. 3576—3591.
- A2. *Nokhrina E. E., Beskin V. S., Kovalev Y. Y., Zheltoukhov A. A.* Intrinsic physical conditions and structure of relativistic jets in active galactic nuclei // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Т. 447. — С. 2726—2737.
- A3. *Hawley J., Fendt C., Hardcastle M., Nokhrina E., Tchekhovskoy A.* Disks and Jets. Gravity, Rotation and Magnetic Fields // *Space Science Reviews*. — 2015. — Т. 191. — С. 441—469.
- A4. *Nokhrina E. E.* Brightness temperature - obtaining the physical properties of a non-equipartition plasma // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Т. 468. — С. 2372—2381.
- A5. *Nokhrina E. E., Beskin V.* On the acceleration and deceleration of relativistic jets in active galactic nuclei – II. Mass loading // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Т. 469. — С. 3840—3850.
- A6. *Beskin V., Chernoglazov A., Kiselev A., Nokhrina E. E.* On the internal structure of relativistic jets collimated by ambient gas pressure // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Т. 472. — С. 3971—3978.
- A7. *Nokhrina E. E.* The Correlation between the Total Magnetic Flux and the Total Jet Power // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2017. — Т. 4. — С. 63.
- A8. *Nokhrina E. E., Gurvits L. I., Beskin V. S., Nakamura M., Asada K., Hada K.* M87 black hole mass and spin estimate through the position of the jet boundary shape break // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Т. 489. — С. 1197—1205.
- A9. *Nokhrina E. E., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B.* Physical parameters of active galactic nuclei derived from properties of the jet geometry transition region // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Т. 498. — С. 2532—2543.

- A10. *Nokhrina E. E., Pashchenko I. N., Kutkin A. M.* Parabolic jet shape on parsec scales in high redshift AGN // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Т. 509. — С. 1899—1911.

Публикации автора по теме диссертации в материалах конференций: [B1].

- B1. *Nokhrina E.* Proceedings of the International Astronomical Union // Perseus in Sicily: from black hole to cluster outskirts, IAU Symposium No. 342. — 2018. — С. 197—200.

### **Личный вклад**

Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад диссертанта является основным и определяющим. В работах [A2; A4; A5; A7—A10] диссертантом предложена постановка задачи, проведены теоретические и аналитические расчеты и работа с результатами наблюдений, проведена интерпретация результатов и написан основной текст публикации. В обзоре [A3] диссертантом полностью написана часть, посвященная использованию метода сдвига ядра для определения параметров выбросов. В работе [A6] диссертант совместно с соавторами участвовал в постановке задачи, обсуждении применяемой модели, аналитическом моделировании и формулировке результатов и выводов работы. В работе [A1] диссертант совместно с соавторами участвовал в постановке задачи и внес определяющий вклад в часть, посвященную теоретическому объяснению результатов наблюдений.

### **Объём и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 241 страницу, включая 33 рисунка и 13 таблиц. Список литературы содержит 238 наименований.

### **Содержание работы**

Во **введении** излагается современное состояние исследований, касающихся теоретических и численных моделей релятивистских струйных выбросов и наблюдательных данных, позволяющих оценивать параметры этих моделей, обосновывается актуальность темы диссертации. Затем формулируются цели и задачи работы, обсуждается её научная новизна и значимость, перечисляются использованные методы исследования. Далее приводятся положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации результатов и личном вкладе автора в процесс их получения.

**Первая глава** посвящена результатам использования видимого сдвига ядра для определения параметров релятивистских струйных выбросов.

В разделе 1.1 вводятся основные понятия, используемые в работе. Дан обзор модели синхротронного излучения в релятивистской плазме, описаны механизмы нагрева плазмы. На основе модели электромагнитных потерь введены простые оценки мощности выброса и ключевых параметров, которые определяются в Главе 1: начальной замагниченности течения и параметра множественности. Суммированы результаты численного и аналитического исследования режимов ускорения плазмы в выбросах.

В разделе 1.2 получены выражения, определяющие по данным наблюдений значения параметров начальной замагниченности и множественности для двух возможных состояний джета в области ядер на 8-15 ГГц: течение с эффективным ускорением или насыщение ускорения. Два эти режима соответствуют сильной или слабой (включая равенство потоков энергии электромагнитного поля и плазмы) замагниченности течения в области наблюдаемых ядер. Для этого использовалась модель конического выброса, стандартные предположения о зависимости величины магнитного поля  $B \propto r^{-1}$  и концентрации плазмы  $n \propto r^{-2}$  от расстояния до основания джета  $r$  [5] и локальная замагниченность  $\sigma$  для установления соотношения между величинами  $B$  и  $n$ . При этом мы пользовались результатами кинетического моделирования ускорения плазмы на ударных волнах [68] для задания доли излучающей плазмы. В результате получены выражения для оценки параметра множественности  $\lambda$ . Для оценки параметра начальной замагниченности  $\sigma_M$  мы использовали универсальную связь этих двух параметров с мощностью джета. Рассмотрены два состояния замагниченности джета в области ядер и сделан выбор в пользу режима слабой замагниченности.

В разделе 1.3 мы обсуждаем наблюдательные данные, необходимые для получения значений  $\lambda$  и  $\sigma_M$ . Мы используем данные по измерениям сдвига ядра между частотами 8.1 и 15.3 ГГц из работы [69]. Оценки фактора Доплера по кинематике и наблюдаемые углы раскрытия джетов взяты из работы [70]. Для оценки мощности выбросов мы пользуемся эмпирической связью между спектральной плотностью потока выброса на частотах 200 – 400 ГГц и средней мощностью джета, необходимой для образования наблюдаемых полостей [71]. Данные по спектральной плотности потока взяты из базы данных CATS (CATalogues Support System — Система Поддержки Каталогов <sup>1</sup>, [72]).

В разделе 1.4 приведены результаты оценок параметров. И использованные данные наблюдений и значения параметров множественности и замагниченности приведены в Таблицах 1 и 2. Получены характерные величины  $\lambda$  и  $\sigma_M$  и их распределения (см. Рисунок 1). Так как начальная замагниченность течения равна половине максимального фактора Лоренца, которого может достичь джет, если вся энергия электромагнитного поля будет перекачана в кинетическую энергию движения частиц, то для распределения  $\sigma_M$  можно провести сравнение с кинематикой. Последние результаты из работы [34] полностью подтвердили полученный результат.

---

<sup>1</sup><https://www.sao.ru/cats/>

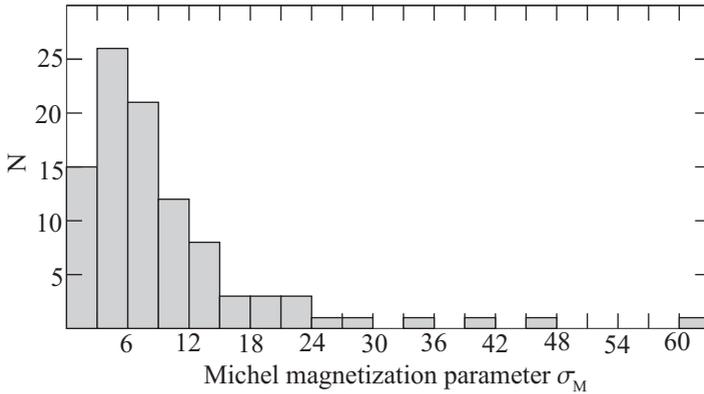


Рис. 1 — Распределение параметра замагниченности Майкела  $\sigma_M$  для выборки из 97 источников. Результат диссертанта из работы [A2].

В разделе 1.5 построены профили распределений физических величин (концентрации плазмы, величин полоидальной и тороидальной компонент магнитного поля, фактора Лоренца плазмы) для парсекового расстояния вдоль выброса и трех характерных значений параметра начальной замагниченности. Для построения профилей использовалось аналитическое моделирование в рамках идеальной осесимметричной магнитной гидродинамики (МГД) для выброса с постоянной угловой скоростью [12; 14] в рамках цилиндрического подхода [12; 18; 73].

В разделе 1.6 мы обсуждаем возможность эффективного ускорения для различных форм границы выбросов ( $r \propto r_{\perp}^a$ ,  $a = 1.5, 2, 3$ ). Для этого мы, опираясь на работы [10; 20], исследуем причинную связность поперек выброса прямым построением характеристик сверхмагнитозвукового течения для найденных в разделе 1.5 профилей физических величин.

В разделе 1.7 суммированы основные результаты и выводы Главы 1. В частности, получена оценка величины параметра причинной связности для параболического выброса [18; 74], находящаяся в хорошем согласии с данными наблюдений [48].

**Вторая глава** посвящена использованию экстремальных измеренных значений яркостной температуры ядер для оценки величины магнитного поля, концентрации плазмы, ее локальной замагниченности, а также мощности выброса и исследованию влияния поперечной структуры выброса на оценку магнитного поля.

В начале Главы 2 дан краткий обзор возможных ограничений на величину яркостной температуры  $T_{\gamma}$ , измеренной в ядре: ограничение, связанное с Комптоновской катастрофой [4], и понятие равновесной яркостной температуры [6]. Равновесная яркостная температура  $\approx 6.7 \times 10^{11}$  К (в системе отсчета источника) в синхротронных источниках с самопоглощением определяется равенством плотности энергии магнитного поля и плазмы в собственной системе отсчета

последней. Таким образом, отклонения данных измерений от этой температуры указывает на сильно неравновесное состояние области излучения. Именно для таких источников проводится исследование методов оценки физических параметров в Главе 2.

В разделе 2.1 мы обсуждаем основные предположения модели: поперечную однородность выброса, выбор зависимостей физических величин от расстояния вдоль джета [5]. Так как работа посвящена источникам, которые по данным измерений яркостной температуры находятся далеко от состояния равномерного распределения плотностей энергий, то мы предлагаем заменить это предположение на дополнительное измерение яркостной температуры [29]. Получено выражение для оценки величины магнитного поля в области ядра по величине  $T_b$ . С помощью этой оценки величины  $B$  мы получаем выражения для определения локальной замагниченности излучающей области  $\Sigma$  и концентрации излучающей плазмы  $n_{\text{rad}}$ .

В части 2.2 полученные формулы мы применяем к двум источникам с надежно измеренными или оцененными снизу экстремальными яркостными температурами: 3C 273 [75] и BL Lac [76]. Величины значений магнитного поля, концентрации плазмы и замагниченности значительно отличаются от равновесных значений в соответствии с [6]. Сделан вывод о том, что стандартной однородной модели излучающей области недостаточно для оценки магнитного поля по яркостной температуре, и для получения оценок необходимо учитывать поперечную структуру выброса.

В разделе 2.3 мы предлагаем модель структуры выброса, рассмотренную в работе [A2] и подтвержденную численным моделированием в работе [59]. Для малых углов наблюдения аналитически получено выражение для амплитуды магнитного поля в выбросе в области наблюдаемого ядра, имеющий по сравнению с выражением для однородной модели фактор отношения локального радиуса джета к радиусу светового цилиндра. Показано, что учет поперечной структуры джета при оценке магнитного поля дает результат, хорошо согласующийся с оценками для магнитного потока и мощности выбросов (часть 2.4).

Раздел 2.5 посвящен использованию полученного результата для неоднородного выброса для оценок магнитного потока в выбросах по яркостной температуре и по сдвигу ядра. Для выборки из 48 источников получены оценки магнитного потока и проведено сравнение с магнитным потоком, полученным в работе [28]. Мы обсуждаем, что полученное систематическое расхождение в значениях объясняется принятым в [28] допущением о том, что параметр причинной связности равен своему максимальному значению, которое примерно в 5 раз превышает оценки по данным наблюдений. Величины магнитного потока хорошо согласуются с наличием диска с нормальной эволюцией в проанализированной выборке источников. Для нашей выборки проведено сравнение мощности выброса, оцененной по величине магнитного потока в предположении о том, что вся мощность джета обеспечивается процессом Блэндфорда–Знайека (запуск джета за счет энергии вращения черной дыры), со средней наблюдаемой мощностью.

Получено распределение, имеющее пик при равенстве обеих оценок, которое говорит о том, что для большинства АЯГ из выборки мощность джета действительно может быть объяснена процессом Блэнфорд–Знайека.

В **третьей главе** мы рассматриваем вопрос о влиянии нагружения выброса вторичной плазмой в результате двухфотонной конверсии на динамику джета. Эта работа мотивирована наблюдаемыми [32] систематическими ускорениями и замедлениями ярких особенностей в струях из АЯГ на масштабах от единиц до десятков парсек.

В части 3.2 рассматривается простейший случай, когда пары рождаются в покое относительно ядра. Впервые показано, что основное влияние пар на локальную динамику плазмы в выбросе связано с возмущениями электрического и магнитного полей вследствие специфического движения пар, разделения зарядов и появления токов. Показано, что в результате рождения вторичной плазмы локально часть джета замедляется, а его замагниченность может как падать, так и возрастать в зависимости от начальной скорости фоновой плазмы и доли вторичной плазмы. Этот эффект связан с частичным экранированием полей и рассмотрен впервые.

В части 3.3 рассмотрены случаи рождения пар с центром масс, имеющим произвольную скорость относительно первичной плазмы. При этом физически интересными оказываются два случая. В первом, вторичные пары рождаются в покое относительно фоновой плазмы (чистое нагружение массой). Показано, что при этом локально плазма джета тормозится, а замагниченность всегда падает. В случае рождения пар с центром масс, движущимся быстрее фоновой плазмы джета, показано, что происходит усиление полей. При этом локальная скорость плазмы может значительно возрастать. Одновременно в этом случае растет и замагниченность.

Показано, что именно эффекты, связанные с разделением зарядов вторичной плазмы, могут оказать существенное влияние на локальную (в области рождения пар) динамику джета даже при относительной концентрации вторичной плазмой порядка 1%. Рассмотренные ранее эффекты нагружения массой [77] приводят к менее выраженному эффекту.

В разделе 3.4 получены оценки светимостей, необходимых для объяснения наблюдаемых ускорений и замедлений выбросов [32]. Сделан вывод о принципиальной возможности рассмотренного эффекта повлиять локально на динамику в джете.

В разделе 3.5 рассматривается возможное возникновение некоторых неустойчивостей в связи с эффектами рождения пар. Сделан вывод о том, что локальные замедления и ускорения плазмы во внешних частях выброса могут быть источником неустойчивостей, приводящих к локальному нагреву плазмы и излучению.

**Четвертая глава** посвящена недавно открытому явлению перехода формы границы джета от параболической к конической.

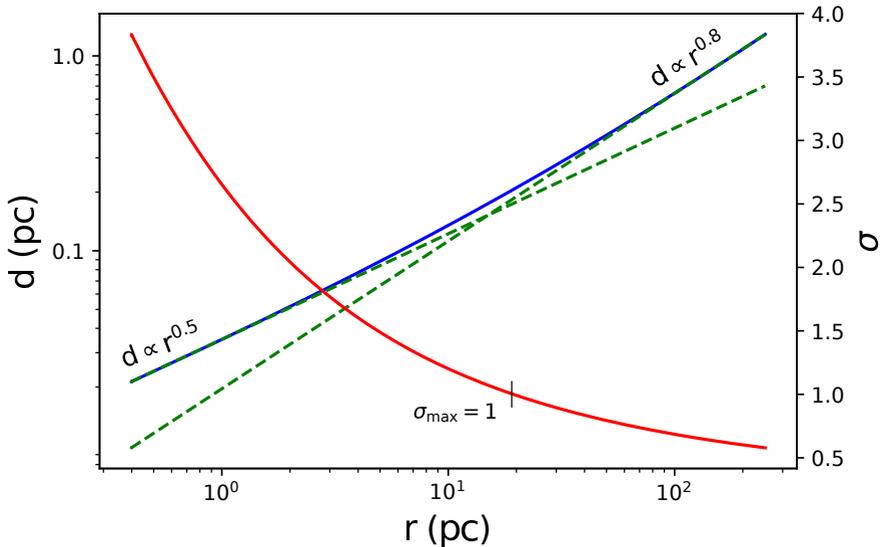


Рис. 2 — Пример формы границы (сплошная голубая линия) для  $\sigma_M = 50$  и  $P_0 = 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup> на расстоянии  $r_0 = 10$  пк. Максимальная замагниченность на заданном срезе изображена сплошной красной линией, черный вертикальный штрих отмечает  $\sigma_{\text{Max}} = 1$ . Точка перехода формы границы от одного степенного закона к другому (зеленые штриховые линии) примерно совпадает с положением штриха: точкой, где максимальная замагниченность на срезе выброса становится равной единице. Результат диссертанта из работы [A1].

В разделе 4.1 описана модель релятивистского струйного выброса с замкнутым током в рамках идеальной осесимметричной магнитной гидродинамики. Дано подробное описание техники решения уравнений для течения с конечной температурой. В рамках цилиндрического подхода, который является хорошим приближением для описания сильно сколламированных течений, получена зависимость давления  $P$  в выбросе от ширины джета  $d$ . Показано, что полученная зависимость  $P(d)$  может быть приближена двумя степенными функциями. При этом для джета, находящегося в равновесии с внешним давлением, заданным для сферически симметричной аккреции (аккреция Бонди) как  $P(r) \propto r^{-b}$  с показателем степени  $b \approx 2$ , форма границы джета изменяется с квазипараболической на квазиконическую (см. Рисунок 2). Показано, что положение изменения формы границы джета (излома) совпадает с расстоянием вдоль выброса, на котором выброс перестает быть сильно замагниченным. Одновременно качественно изменяется поведение Лоренц фактора: переход от быстрого ускорения к его насыщению. Обсуждается связь положения излома с радиусом Бонди, и возможное присутствие реколламационной ударной волны, видимое как яркая стационарная особенность, ниже по течению от излома.

Объяснение связи формы границы с внутренними свойствами течения позволяет определять ключевые параметры джета, внешней среды и черной дыры по геометрии излома. Это направление подробно рассматривается в разделе 4.2. В части 4.2.1 мы подробно анализируем методы оценки масс черных дыр, использованные для нашей выборки источников. Проведено разделение методов на более (массы  $M_1$ ) и менее (массы  $M_2$ ) надежные. Анализ методов оценки масс важен из-за сильного влияния этих оценок на результаты для величин спинов черных дыр.

В разделе 4.2.2 мы предлагаем метод оценки радиуса светового цилиндра на основе моделирования и измерения ширины выброса в изломе. В случае максимальной эффективности процесса Блэндфорда–Знайека, радиус светового цилиндра связан с гравитационным радиусом и спином черной дыры. Для источников с измеренным изломом и известной оценкой массы получены интервалы значения спинов. Спины 4 из 6 СМЧД с надежно измеренной массой лежат в диапазоне 0.1 – 0.3, хорошо согласующимся с результатами моделирования эволюции масс и спинов ЧД [78–80]. Все спины с оценками масс менее надежными методами имеют значения порядка 0.01, что указывает на возможную недооценку масс  $M_2$ . Для источников, демонстрирующих коническую форму выброса, мы приняли ширину ядра на 15 ГГц в качестве оценки сверху ширины джетов в предполагаемом изломе. Показано, что медианное значение спина в этом случае равно 0.1 в согласии с результатами для точно измеренных ширин выбросов в изломах. Это показывает, что ширина ядер является хорошей оценкой для ширины джета в изломе.

В разделе 4.2.3 мы анализируем возможные признаки недооценки масс ЧД методом корреляции между размером области формирования широких линий и светимости линий в оптическом и УФ диапазонах. Мы обнаружили значимую отрицательную корреляцию масс  $M_2$  с углом наблюдения выброса. Мы проверили, что для источников с оценками масс по кинематике такая корреляция отсутствует. Мы предложили возможные источники этого эффекта. Мы предложили метод оценки масс черных дыр по ширине джета в изломе в предположении о том, что безразмерный спин АЯГ с джетом должен лежать в пределах (0.1, 0.99). В этом случае наш метод имеет точность в один порядок величины, а результаты для масс хорошо согласуются с оценками по кинематике и с оценками другими методами для малых углов наблюдения.

В части 4.2.4 мы обсуждаем амплитуду внешнего давления, необходимого для удержания джетов. Показано, что ширина джета в изломе связана с давлением внешней среды в изломе и магнитным потоком в выбросе, и эта связь не зависит от величины начальной замагниченности выброса. Пользуясь связью мощности выброса с величиной магнитного потока, для 10 источников получены оценки величины давления внешней среды в изломе, на расстоянии  $10^5 r_g$  и на расстоянии 10 парсек. Мы обсуждаем, какие свойства АЯГ и среды отражают эти значения. Для источника 1637+826 результаты нашей оценки находятся

в хорошем согласии с данными наблюдений [62]. Для М87 по данным темпа аккреции по моделированию фарадеевского вращения в работе [81] показано, что диск в этом источнике находится в магнитоарестованном состоянии в согласии с результатами Телескопа Горизонта Событий [67] для невысоких значений спина. В разделе 4.2.5 подведены основные итоги этой части работы.

Раздел 4.3 посвящен галактике М87 — наиболее подробно исследованному АЯГ. В части 4.3.1 мы описываем данные наблюдений по зависимости ширины выброса от расстояния вдоль него, предоставленные соавторами Кеичи Асада, Масанори Накамура и Леонидом Гурвицем. В разделе 4.3.2 мы получаем выражение для оценки массы черной дыры по геометрии выброса, данным измерения давления внешней среды и темпу аккреции. Таким образом, для М87 возможно независимо оценить спин, массу черной дыры, магнитный поток в выбросе и его мощность.

В части 4.3.3 мы подгоняем форму выброса аналитическим моделированием на расстояниях от 1 до  $10^4$  парсек и определяем положение излома и ширину джета (см. Рисунок 3). Данные моделирования и подгонки использованы при оценке параметров М87.

В разделе 4.3.4 мы анализируем источники ошибок, и в разделе 4.3.5 приводим метод оценки и результаты для массы и спина ЧД в М87. Полученная масса ЧД находится в хорошем согласии с результатами оценки по кинематике газа [82] и с результатами Телескопа Горизонта Событий [67]. При этом мы получили интервал значений спина (0.1, 0.3). Величина магнитного потока и мощность джета хорошо согласуется с независимыми оценками [28; 60]. В части 4.3.6 мы обсуждаем метод и полученные результаты, а в части 4.3.7 сравниваем наши оценками с результатами [67].

Часть 4.4 посвящена неявному методу исследования формы основания выбросов для далеких источников, в которых непосредственное измерение формы джета ограничено конечным разрешением инструментов. Это возможно для источников с измеренной величиной сдвига ядра и оценкой скорости плазмы, полученной по запаздыванию вспышек в ядрах [83]. В разделе 4.4.1 мы показываем, как универсальный характер эффективного ускорения плазмы в джете позволяет оценивать локальную ширину выброса. Вместе с измеренным положением вдоль выброса это позволяет сделать вывод о форме границы джета в области ядер. В части 4.4.2 мы подробно рассматриваем связь начальной замагниченности выброса с максимальным фактором Лоренца для разных моделей джетов. В пункте 4.4.3 мы описываем наблюдательные данные, и в части 4.4.4 подробно описываем метод оценки формы выброса. В части 4.4.5 мы показываем, что ядра, находящиеся в параболической эффективно ускоряющейся части выброса, должны занимать относительную узкую полосу в плоскости фактор Лоренца — расстояние вдоль выброса. Этот результат не зависит от максимально возможной скорости каждого отдельного выброса. Мы находим связь между давлением и магнитным потоком в выбросе с параметром раскрыва его параболической части.

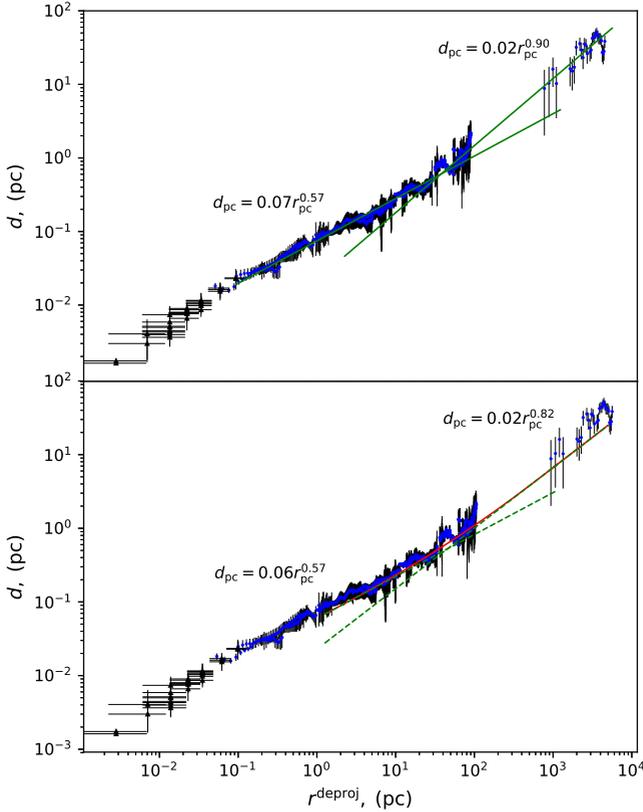


Рис. 3 — Данные наблюдений [15] и результат моделирования [A8] формы границы выброса из M87. Моделирование из работы [A8] выполнено диссертантом.

В частях 4.4.6–4.4.8 мы показываем, что данные наблюдений находятся в очень хорошем согласии с моделью, в которой ядра на частотах 15 и 8 ГГц находятся в параболической части джета и эффективно ускоряются. Модели с конической формой или с насыщением ускорения противоречат данным наблюдений. В разделе 4.4.9 мы дополнительно используем измерения параметров излома в трех источниках для оценки их параметров. При этом оценки спинов оказываются выше за счет дополнительных данных измерений скоростей.

В части 4.4.10 мы анализируем влияние параболической формы выброса и другие возможные эффекты, которые могут повлиять на наши выводы. В части 4.4.11 отдельно рассмотрено влияние ускорения джета между ядрами на результат. В части 4.4.12 мы вычисляем показатель степени для частотной зависимости положения ядра в случае параболического и параболического ускоряющегося течения. Полученный результат находится в хорошем согласии с последними

данными измерений (например, [47]). Мы также предсказываем переоценку положения начала джета в предположении о конической форме его основания и показываем, что особенности геометрии в M87 [84] могут быть объяснены этим эффектом.

В частях 4.4.13–4.4.14 мы обсуждаем полученные результаты и формулируем выводы раздела 4.4.

В **заключении** подведены итоги работы, обсуждаются перспективы дальнейших исследований по данной тематике.

## Список литературы

1. *Blandford R., Meier D., Readhead A.* Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2019. — Т. 57. — С. 467.
2. *Bisnovatyi-Kogan G., Ruzmaikin A.* The Accretion of Matter by a Collapsing Star in the Presence of a Magnetic Field // Astrophysics and Space Science. — 1974. — Т. 28. — С. 45—59.
3. *Bisnovatyi-Kogan G., Ruzmaikin A.* The Accretion of Matter by a Collapsing Star in the Presence of a Magnetic Field. II: Self-consistent Stationary Picture // Astrophysics and Space Science. — 1976. — Т. 42. — С. 401—424.
4. *Kellermann K., Pauliny-Toth I.* The Spectra of Opaque Radio Sources // The Astrophysical Journal. — 1969. — Т. 155. — С. L71.
5. *Blandford R. D., Königl A.* Relativistic jets as compact radio sources // The Astrophysical Journal. — 1979. — АБГ. — Т. 232. — С. 34—48.
6. *Readhead A.* Equipartition Brightness Temperature and the Inverse Compton Catastrophe // The Astrophysical Journal. — 1994. — Т. 426. — С. 51.
7. *Lyutikov M., Pariev V., Gabuzda D.* Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2005. — Т. 360. — С. 869—891.
8. *Lobanov A.* Ultracompact jets in active galactic nuclei // Astronomy & Astrophysics. — 1998. — Т. 330. — С. 79.
9. *Beskin V., Kuznetsova I., Rafikov R.* On the MHD effects on the force-free monopole outflow // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1998. — Т. 299. — С. 341—348.
10. *Tchekhovskoy A., McKinney J. C., Narayan R.* Efficiency of Magnetic to Kinetic Energy Conversion in a Monopole Magnetosphere // The Astrophysical Journal. — 2009. — Т. 699. — С. 1789—1808.
11. *Komissarov S., M. B., Vlahakis N.* [и др.]. Magnetic acceleration of ultrarelativistic jets in gamma-ray burst sources // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2006. — Т. 394. — С. 1182—1212.
12. *Beskin V. S., Nokhrina E. E.* The effective acceleration of plasma outflow in the paraboloidal magnetic field // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2006. — Т. 367. — С. 375—386.
13. *Komissarov S., Barkov M., et al.* Magnetic acceleration of relativistic active galactic nucleus jets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2007. — Т. 380. — С. 51.
14. *Lyubarsky Y.* Asymptotic Structure of Poynting-Dominated Jets // The Astrophysical Journal. — 2009. — Т. 698. — С. 1570—1589.

15. *Nakamura M., Asada K., Hada K.* [и др.]. Parabolic jets from the spinning black hole in M87 // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Т. 868. — С. 146.
16. *Bogovalov S.* Formation of jets during the ejection of plasma by an axisymmetric rotator // *Astronomy Letters*. — 1995. — Т. 21. — С. 633.
17. *Heyvaerts J., Norman C.* Global Asymptotic Solutions for Relativistic Magnetohydrodynamic Jets and Winds // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Т. 596. — С. 1240—1255.
18. *Beskin V. S., Nokhrina E. E.* On the central core in MHD winds and jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Т. 397. — С. 1486—1497.
19. *McKinney J., Tchekhovskoy A., Blanford R.* General relativistic magnetohydrodynamic simulations of magnetically choked accretion flows around black holes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — Т. 423. — С. 2083.
20. *Komissarov S. S., Vlahakis N., Königl A.* [и др.]. Magnetic acceleration of ultrarelativistic jets in gamma-ray burst sources // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Т. 394. — С. 1182.
21. *Blandford R., Znajek R.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1977. — Т. 179. — С. 433.
22. *Beskin V.* Magnetohydrodynamic models of astrophysical jets // *Physics Uspekhi*. — 2010. — Т. 53. — С. 1199.
23. *Chatterjee K., Liska M., Tchekhovskoy A.* [и др.]. Accelerating AGN jets to parsec scales using general relativistic MHD simulations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Т. 490. — С. 2200—2218.
24. *Kovalev Y., Kellermann K., Lister M.* [и др.]. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine-Scale Structure // *The Astrophysical Journal*. — 2005. — Т. 130. — С. 2473—2505.
25. *Pushkarev A., Hovatta T., Kovalev Y.* [и др.]. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astronomy & Astrophysics*. — 2012. — Т. 545. — A113.
26. *Hirovani K.* Kinetic Luminosity and Composition of Active Galactic Nuclei Jets // *The Astrophysical Journal*. — 2005. — Т. 619. — С. 73—85.
27. *O'Sullivan S., Gabuzda D.* Magnetic field strength and spectral distribution of six parsec-scale active galactic nuclei jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Т. 400. — С. 26—42.
28. *Zamaninasab M., Clausen-Brown E., Savolainen T.* [и др.]. Dynamically important magnetic fields near accreting supermassive black holes // *Nature*. — 2014. — Т. 510. — С. 126.

29. *Zdziarski A., Sikora M., Pjanka P.* [и др.]. Semidynamical models of radio jets: relativistic beaming and source counts // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Т. 451. — С. 927.
30. *Biretta J., Sparks W. B., Macchetto F.* Hubble Space Telescope Observations of Superluminal Motion in the M87 Jet // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — АВГ. — Т. 520. — С. 621—626.
31. *Lister M., Cohen M., Homan D.* [и др.]. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets // *The Astronomical Journal*. — 2009. — Т. 138. — С. 1874—1892.
32. *Homan D. C., Lister M. L., Kovalev Y. Y.* [и др.]. MOJAVE. XII. Acceleration and Collimation of Blazar Jets on Parsec Scales // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Т. 798. — С. 134.
33. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D.* [и др.]. MOJAVE: XIII. Parsec-scale AGN Jet Kinematics Analysis Based on 19 years of VLBA Observations at 15 GHz // *Astronomical Journal*. — 2016. — Т. 152. — С. 12.
34. *Lister M. L., Homan D. C., Hovatta T.* [и др.]. MOJAVE. XVII. Jet Kinematics and Parent Population Properties of Relativistically Beamed Radio-loud Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Т. 874. — С. 43.
35. *Mertens F., Lobanov A., Walker R.* [и др.]. Kinematics of the jet in M 87 on scales of 100-1000 Schwarzschild radii // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Т. 595. — A54.
36. *Asada K., Nakamura M.* The Structure of the M87 Jet: A Transition from Parabolic to Conical Streamlines // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — Т. 745. — С. L28.
37. *Boccardi B., Krichbaum T. P., Bach U.* [и др.]. The stratified two-sided jet of Cygnus A. Acceleration and collimation // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Т. 585. — A33.
38. *Nakahara S., Doi A., Murata Y.* [и др.]. The Cygnus A Jet: Parabolic Streamlines up to Kiloparsec Scales // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Т. 878. — С. 61.
39. *Tseng C.-Y., Asada K., Nakamura M.* [и др.]. Structural Transition in the NGC 6251 Jet: an Interplay with the Supermassive Black Hole and Its Host Galaxy // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Т. 833. — С. 288.
40. *Hada K., Doi A., Wajima K.* [и др.]. Collimation, Acceleration, and Recollimation Shock in the Jet of Gamma-Ray Emitting Radio-loud Narrow-line Seyfert 1 Galaxy 1H0323+342 // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Т. 860. — С. 141.
41. *Akiyama K., Asada K., Fish V.* [и др.]. The Global Jet Structure of the Archetypical Quasar 3C 273 // *Galaxies*. — 2018. — Т. 6. — С. 15.

42. *Nakahara S., Doi A., Murata Y.* [и др.]. Finding Transitions of Physical Condition in Jets from Observations over the Range of  $10^3$ - $10^9$  Schwarzschild Radii in Radio Galaxy NGC 4261 // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Т. 854. — С. 148.
43. *Giovannini G., Savolainen T., Orienti M.* [и др.]. A wide and collimated radio jet in 3C84 on the scale of a few hundred gravitational radii // *Nature Astronomy*. — 2018. — Т. 2. — С. 472—477.
44. *Boccardi B., Migliori G., Grandi P.* [и др.]. The TeV-emitting radio galaxy 3C 264. VLBI kinematics and SED modeling // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — Т. 627. — A89.
45. *Nakahara S., Doi A., Murata Y.* [и др.]. The Two-sided Jet Structures of NGC 1052 at Scales from 300 to  $4 \times 10^7$  Schwarzschild Radii // *Astronomical Journal*. — 2020. — Т. 159. — С. 14.
46. *Boccardi B., Perucho M., Casadio C.* [и др.]. Jet collimation in NGC 315 and other nearby AGN // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Т. 647. — A67.
47. *Park J., Hada K., Nakamura M.* [и др.]. Jet Collimation and Acceleration in the Giant Radio Galaxy NGC 315 // *The Astrophysical Journal*. — 2021. — Т. 909. — С. 76.
48. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L.* [и др.]. MOJAVE — XIV. Shapes and opening angles of AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Т. 468. — С. 4992—5003.
49. *Narayan Rand Igumenshchev I., Abramowicz M.* Magnetically Arrested Disk: an Energetically Efficient Accretion Flow // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2003. — Т. 55. — С. L69—L72.
50. *Bisnovatyi-Kogan G., Lovelace R.* Large-Scale B-Field in Stationary Accretion Disks // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — Т. 667. — С. L167—L169.
51. *Tchekhovskoy A., Narayan R., McKinney J.* Efficient generation of jets from magnetically arrested accretion on a rapidly spinning black hole // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. — 2011. — Т. 418. — С. L79—L83.
52. *Begelman M., Scepi N., Dexter J.* What really makes an accretion disc MAD // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Т. 511. — С. 2040—2051.
53. *Woo J. H., Urry C. M.* Active Galactic Nucleus Black Hole Masses and Bolometric Luminositites // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Т. 579. — С. 530—544.
54. *Peterson B.* Reverberation Mapping of Active Galactic Nuclei // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1993. — Т. 105. — С. 247.

55. *Kaspi S., Smith P., Maoz D.* [и др.]. Measurement of the Broad Line Region Size in Two Bright Quasars // *Astrophysical Journal Letters*. — 1996. — Т. 471. — С. L75.
56. *Torrealba J., Chavushyan V., Cruz-González I.* [и др.]. Optical Spectroscopic Atlas of the MOJAVE/2cm AGN Sample // *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*. — 2012. — Т. 48.
57. *McLure R. J., Jarvis M. J.* Measuring the black hole masses of high-redshift quasars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2002. — Ноябрь. — Т. 337. — С. 109—116.
58. *Vestergaard M., Peterson B.* Determining central black hole masses in distant active galaxies and quasars. II. Improved optical and UV relationships. // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — Т. 641. — С. 689—709.
59. *Tchekhovskoy A., Bromberg O.* Three-dimensional relativistic MHD simulations of active galactic nuclei jets: magnetic kink instability and Fanaroff-Riley dichotomy // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. — 2016. — Т. 461. — С. L46—L50.
60. *Levinson A., Globus N.* Reconfinement of highly magnetized jets: implications for HST-1 in M87 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Т. 465. — С. 1608—1612.
61. *Di Matteo T., Allen S., Fabian A.* [и др.]. Accretion onto the Supermassive Black Hole in M87 // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — С. 133—140.
62. *Evans D. A., Hardcastle M. J., Croston J. H.* [и др.]. Chandra and XMM-Newton observations of NGC 6251 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2005. — Май. — Т. 359. — С. 363—382.
63. *Russell H. R., Fabian A. C., McNamara B. R.* [и др.]. Inside the Bondi radius of M87 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Т. 451. — С. 588—600.
64. *Quataert E., Narayan R.* The Cooling Flow to Accretion Flow Transition // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — Т. 528. — С. 236—242.
65. *Shcherbakov R. V.* Spherically Symmetric Accretion Flows: Minimal Model with Magnetohydrodynamic Turbulence // *Astrophysical Journal Supplement*. — 2008. — Т. 177. — С. 493—514.
66. *Narayan R., Fabian A. C.* Bondi flow from a slowly rotating hot atmosphere // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — Т. 415. — С. 3721—3730.
67. *EHT Collaboration, et al.* First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring // *Astrophysical Journal Letters*. — 2019. — Т. 875. — L5 (Paper V).

68. *Sironi L., Spitkovsky A., Arons J.* The Maximum Energy of Accelerated Particles in Relativistic Collisionless Shocks // *Astrophysical journal.* — 2013. — T. 771. — C. 54.
69. *Pushkarev A., Hovatta T., et al.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astronomy & Astrophysics.* — 2012. — T. 545. — A113.
70. *Pushkarev A., Kovalev Y., et al.* Jet opening angles and gamma-ray brightness of AGN // *Astronomy & Astrophysics.* — 2009. — T. 507. — C. L33—L36.
71. *Cavagnolo K., McNamara B., et al.* A Relationship Between AGN Jet Power and Radio Power // *The Astrophysical Journal.* — 2010. — T. 720. — C. 1066—1072.
72. *Verkhodanov O., Trushkin S., et al.* The CATS Database to Operate with Astrophysical Catalogs // *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI.* T. 125 / под ред. G. Hunt, H. E. Payne. — The address of the publisher : ASP Conference Series, 09.1997. — C. 322.
73. *Beskin V. S., Malyshkin L. M.* On the Internal Structure of Relativistic Jets // *Astronomy Letters.* — 2000. — T. 26. — C. 4.
74. *Blandford R. D.* Accretion disc electrodynamics - a model for double radio sources // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 1976. — T. 176. — C. 465—481.
75. *Kovalev Y., Kardashev N., Kellermann K.* [и др.]. RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit // *The Astrophysical Journal Letters.* — 2016. — T. 820. — C. L9.
76. *Gómez J., Lobanov A., Bruni G.* [и др.]. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // *The Astrophysical Journal.* — 2016. — T. 817. — C. 96.
77. *Lyutikov M.* Mass-loading of pulsar winds // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2003. — T. 339. — C. 623—632.
78. *Barausse E.* The evolution of massive black holes and their spins in their galactic hosts // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2012. — T. 423. — C. 2533.
79. *Volonteri M., Sikora M., Lasota J.-P.* [и др.]. The Evolution of Active Galactic Nuclei and their Spins // *The Astrophysical Journal.* — 2013. — T. 775. — C. 94.
80. *Sesana A., Barausse E., Dotti M.* [и др.]. Linking the Spin Evolution of Massive Black Holes to Galaxy Kinematics // *The Astrophysical Journal.* — 2014. — T. 794. — C. 104.

81. *Kuo C., Asada K., Rao R.* [и др.]. Measuring Mass Accretion Rate onto the Supermassive Black Hole in M87 Using Faraday Rotation Measure with the Submillimeter Array // *Astrophysical Journal Letters*. — 2014. — Т. 783. — С. L33.
82. *Gebhardt K., Adams J., Richstone D.* [и др.]. The Black Hole Mass in M87 from Gemini/NIFS Adaptive Optics Observations // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Март. — Т. 729. — С. 119.
83. *Kutkin A. M., Pashchenko I. N., Sokolovsky K. V.* [и др.]. Opacity, variability, and kinematics of AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Июнь. — Т. 486. — С. 430—439.
84. *Hada K., Kino M., Doi A.* [и др.]. The Innermost Collimation Structure of the M87 Jet Down to 10 Schwarzschild Radii // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Сент. — Т. 775. — С. 70.

*Нохрина Елена Евгеньевна*

Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений

Автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

