

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

Усков Григорий Сергеевич

**Отождествление и многоволновое исследование
активных ядер галактик, обнаруженных телескопом
ART-XC орбитальной рентгеновской обсерватории
Спектр-РГ**

Специальность: 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в отделе астрофизики высоких энергий Института космических исследований Российской академии наук.

Научный руководитель: **Сазонов Сергей Юрьевич**
доктор физико-математических наук, профессор РАН

Официальные оппоненты: **Власюк Валерий Валентинович**,
кандидат физико-математических наук,
руководитель научного направления Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Засов Анатолий Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Троицкий Сергей Вадимович,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник Института ядерных исследований Российской академии наук

Защита состоится 18 декабря 2025 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский п-кт, д. 13, конференц-зал.

Email: dissovet@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский п-кт, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3637>

Автореферат разослан 13 ноября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.013.1,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Активные ядра галактик (АЯГ) продолжают оставаться в фокусе внимания астрофизиков. В таких объектах мы можем изучать то, как происходит аккреция вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД). Исследования АЯГ, как и событий приливного разрушения в ядрах галактик, ультраярких рентгеновских источников в близких галактиках и рентгеновских двойных систем в Галактике, позволяют развивать теорию аккреции вещества на релятивистские компактные объекты и изучать физические процессы, происходящие в экстремальных физических условиях. Большой интерес вызывают и свойства самих черных дыр, на которые происходит аккреция в АЯГ. Из аргумента Золтана [1–3] следует, что основным каналом роста СМЧД во Вселенной была аккреция в радиационно-эффективном режиме (когда объект проявляет себя как квазар или сейфертовская галактика). Однако все еще остается большая неопределенность по поводу «демографии» АЯГ, причем не только на больших красных смещениях, но и в сравнительно близкой Вселенной.

Дело в том, что наблюдаемые свойства АЯГ сильно зависят от ориентации объекта по отношению к наблюдателю. Это объясняется тем, что основное (ультрафиолетовое и оптическое) излучение, возникающее в аккреционном диске, а также излучение в широких оптических линиях, тоже рождающееся недалеко от СМЧД, при наблюдении с определенных направлений оказывается скрыто от нас за толстой обложкой из холодного газа и пыли – так называемым «тором» (см. обзор [4]). Установлено, главным образом благодаря рентгеновским обзорам, что такие «поглощенные» АЯГ составляют значительную долю от всех объектов, а именно от $\sim 20\%$ среди самых мощных АЯГ вплоть до $\sim 80\%$ среди АЯГ сравнительно низкой светимости (например, [5–9]). Однако в этих оценках сохраняется значительная неопределенность, причем они в основном относятся к сравнительно близкой Вселенной.

Необходимость в улучшении демографической статистики АЯГ диктуется и пробелами в нашем понимании внутреннего устройства АЯГ. Одним из важнейших достижений последних лет стала возможность строить изображения области образования широких эмиссионных линий и газопылевого «тора» с помощью интерферометрических наблюдений в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах (например, [10–12]). Однако такие изображения пока остаются сильно «размытыми» и не способны разрешать предполагаемую комковатую структуру этих ключевых структурных элементов активного ядра. Что же касается внутренних областей аккреционного диска и его горячей короны, то они по-прежнему исследуются астрономами как точечные источники (за исключением знаменитых

«теней» центральных черных дыр в Галактике и в галактике M87) – по светимости, спектру, переменности и поляризации их излучения. При этом многие ключевые вопросы, такие как геометрические и физические свойства короны, остаются нерешенными.

Рентгеновское излучение – один из самых универсальных индикаторов активности аккрецирующей СМЧД: оно рождается при комптоновском рассеянии ультрафиолетовых фотонов из аккреционного диска на электронах в горячей короне, расположенной вблизи чёрной дыры. При этом формируется степенной континуум (см., например, [13; 14]), на который приходится заметная доля ($\gtrsim 10\%$) болометрической светимости АЯГ (см., например, [3]). Значительная часть этого жесткого рентгеновского излучения может отражаться от аккреционного диска и газопылевого тора в сторону наблюдателя. Рентгеновские спектры, таким образом, позволяют одновременно исследовать наклон континуума, оценивать колонку поглощающего вещества N_H на луче зрения и изучать признаки отраженного и переработанного излучения, такие как комптоновский горб (в широком диапазоне энергий с максимумом на ~ 30 кэВ) и линия железа $K\alpha$ (в районе 6.4 кэВ), а, например, характеристики последней позволяют судить о температуре, степени ионизации и других физических свойствах плазмы во внутренней области аккреционного диска. Кроме того, важно изучать переменность (т.е. строить кривые блеска) АЯГ в рентгеновском диапазоне, особенно в сравнении с их переменностью в оптическом диапазоне, так как это дает дополнительные сведения о свойствах (в частности, характерных размерах) аккреционного диска и горячей короны.

Всё это делает рентгеновский диапазон ключевым для изучения как «демографии», так и внутренней структуры АЯГ. Ключевую роль при этом играют статистические подходы, основанные на использовании больших однородных выборок АЯГ, причем несильно искаженных эффектами наблюдательной селекции. Как было доказано многочисленными исследованиями последних двадцати лет, для составления таких выборок АЯГ хорошо подходят рентгеновские обзоры всего неба. Однако при этом важен конкретный диапазон энергий, в котором происходит поиск и детектирование источников. Так, преимуществом мягких рентгеновских отборов (на энергиях ниже 2 кэВ), таких как обзор обсерватории ROSAT [15; 16] и более современный обзор телескопа *eROSITA* [17] обсерватории *CPT* [18], является высокая чувствительность, что позволяет находить огромное количество АЯГ, в том числе квазаров на больших красных смещениях. Однако такой отбор страдает от сильной отрицательной селекции в отношении АЯГ второго типа (по оптической классификации), которые обычно характеризуются значительным внутренним поглощением вдоль луча зрения. Наоборот, обзоры всего неба в жестком рентгеновском диапазоне (выше 10 кэВ), такие как «синтетические» обзоры прибора BAT обсерватории Swift [19] и прибора IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ [20], позволяют

искать АЯГ с разной степенью поглощения, но при этом характеризуются гораздо меньшей чувствительностью по сравнению с мягкими рентгеновскими обзорами, что сужает область поиска АЯГ до близкой Вселенной ($z \lesssim 0.1$).

Недавно был выпущен каталог источников ARTSS1-5 [21], обнаруженных в «среднем» рентгеновском диапазоне энергий 4–12 кэВ в ходе обзора всего неба телескопом *ART-XC* им. М.Н. Павлинского [22] обсерватории *CPI*. Этот каталог примерно на две трети состоит из АЯГ (более 900 объектов). Эта выборка по своим свойствам заполняет нишу между существующими выборками АЯГ, полученными по данным мягких и жестких рентгеновских обзоров неба. В частности, в ней статистически полно представлены АЯГ с умеренным поглощением ($N_{\text{H}} \sim 10^{22} - 10^{23}$ атомов водорода на кв. см), причем вплоть до значительных красных смещений ($z \lesssim 0.3$). Другим важным достоинством нового каталога АЯГ является его высокая полнота (практически недостижимая для больших каталогов мягких рентгеновских обзоров) с точки зрения оптического отождествления и классификации рентгеновских источников. Наконец, в каталоге ARTSS1-5, как будет показано в диссертации, встречаются достаточно уникальные АЯГ, которые важно исследовать более подробно с привлечением дополнительных данных. Сравнительно небольшой размер каталога позволяет поставить задачу об отождествлении и индивидуальном исследовании всех источников, входящих в него, в том числе новых источников, открытых телескопом *ART-XC*, и ранее известных рентгеновских источников, природа которых была неизвестна или плохо изучена. Для решения этой задачи необходимо привлечь данные других рентгеновских телескопов, в частности, телескопа *eROSITA* обсерватории *CPI*, и наблюдений в других диапазонах электромагнитного спектра, и в том числе проводить оптические спектроскопические наблюдения с целью измерения красных смещений и классификации АЯГ.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является отождествление активных ядер галактик, зарегистрированных в ходе рентгеновского обзора всего неба и направленных наблюдений телескопа *ART-XC* им. М.Н. Павлинского обсерватории *CPI*, и изучение физических свойств этих объектов. Для достижения этой цели было необходимо решить следующие задачи:

- Установить природу и исследовать физические свойства кандидатов в АЯГ, зарегистрированных в ходе рентгеновского обзора всего неба телескопа *ART-XC*. Для этого: 1) провести спектроскопию этих объектов на оптических телескопах 1.5-м класса и обработать полученные данные, 2) исследовать рентгеновские спектры объектов на основе данных обзора всего неба телескопов *eROSITA*

- и *ART-XC*, 3) обобщить всю имеющуюся по объектам многоволновую информацию.
- Отождествить и детально исследовать физические свойства кандидата в мощные квазары SRGA J2306+1556 на $z = 0.4389$, обнаруженного в ходе рентгеновского обзора всего неба телескопа *ART-XC*. Для этого: 1) проанализировать архивную фотометрическую и спектроскопическую информацию по этому объекту в оптическом, ИК и радио диапазонах, 2) проанализировать рентгеновские спектры и кривые блеска, полученные телескопом *ART-XC* в ходе обзора всего неба, а также телескопами *ART-XC* и *Swift*/XRT в ходе направленных наблюдений.
 - Детально исследовать рентгеновский спектр и переменность рентгеновского излучения мощного квазара PG 1634+706 на $z = 1.337$ на основе данных, полученных телескопами *eROSITA*, *ART-XC* обсерватории *CPT* и обсерваторией *XMM-Newton*.

Научная новизна

Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми.

1. Установлена природа 48 источников, обнаруженных в ходе рентгеновского обзора всего неба телескопа *ART-XC* им. М.Н. Павлинского обсерватории *CPT*. Показано, что они являются сейфертовскими галактиками разных типов на красных смещениях $z \lesssim 0.3$.
2. Обнаружен и отождествлен квазар SRGA J2306+1556 на $z = 0.4389$, характеризующийся уникальным сочетанием свойств для Вселенной на $z \lesssim 0.5$, а именно высокой рентгеновской светимостью ($\sim 6 \times 10^{45}$ эрг/с в максимуме кривой блеска в диапазоне энергий 2–10 кэВ), значительным внутренним поглощением ($N_{\text{H}} \sim 2 \times 10^{23}$ см $^{-2}$) вдоль луча зрения и громкостью в радиодиапазоне.
3. Впервые детально исследован в рентгеновских лучах квазар PG 1634+706 на $z = 1.337$ – один из самых мощных во Вселенной на $z \lesssim 1.5$. Показано, что его рентгеновский спектр схож со спектрами АЯГ значительно более низкой светимости, а его рентгеновская светимость варьировалась не более чем в 2.5 раза за многолетнюю историю наблюдений объекта.

Научная и практическая значимость

Представленные в диссертации результаты оптической и рентгеновской спектроскопии 48 активных ядер галактик позволили повысить полноту отождествления и классификации рентгеновских источников, обнаруженных в ходе первых четырех полных и 40% пятого обзора всего

неба телескопа *ART-XC* им. М.Н. Павлинского обсерватории *СРГ* (каталог ARTSS1-5, [21]), до примерно 95%. В настоящее время диссертант с коллегами продолжают эту работу с целью достижения 100% полноты отождествления и классификации источников в каталоге ARTSS1-5 и составления на его основе статистически полной базы многоволновых данных, которую затем можно будет использовать для исследования популяционных свойств АЯГ и других классов объектов. Доступ к базе данных будет открыт для всех ученых. Предполагается, что работа по отождествлению и классификации рентгеновских источников из обзора всего неба *СРГ/ART-XC* станет еще более масштабной после того, как будет создан (ориентировочно в 2026 году) новый каталог источников (в который, ориентировочно, войдет ~ 3000 объектов), зарегистрированных в ходе восьми обзоров всего неба *ART-XC*, так как не только абсолютное число, но и относительная доля новых (более слабых по потоку) источников возрастает по мере накопления экспозиции, т.е. с увеличением чувствительности обзора. При этом будут использоваться методы и подходы, отработанные в ходе диссертационной работы.

Обнаруженный в ходе обзора всего неба *СРГ/ART-XC* источник SRGA J2306+1556 является одним из ближайших радиогромких, поглощённых квазаров высокой светимости. При этом его физические свойства должны быть схожи с квазарами, которые были распространены в первые несколько миллиардов лет жизни Вселенной, но из-за большого удаления от нас не могут быть изучены в подробностях. Поэтому SRGA J2306+1556 может служить ценным источником информации для детального изучения физики таких объектов. Дальнейшие исследования SRGA J2306+1556 могут включать широкополосную рентгеновскую спектроскопию, чтобы получить более строгие ограничения на форму спектра (в частности, для измерения завала на высоких энергиях вследствие эффекта отдачи при комптоновском рассеянии в горячей короне аккреционного диска), низкочастотное радиокартографирование для лучшего выявления крупномасштабных структур и продолжение мониторинга в рентгеновском, оптическом, ИК и радиодиапазонах с целью выявления переменности светимости и спектральных характеристик.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. По результатам оптического отождествления на телескопах АЗТ-33ИК и РТТ-150 и анализа архивных спектров 6dF и SDSS установлено, что 48 рентгеновских источников из обзора *СРГ/ART-XC* являются сейфертовскими галактиками разных типов в диапазоне красных смещений $z = 0.014-0.283$: 19 – первого типа (Sy1), 17 – второго типа (Sy2), 10 – типа 1.9 (Sy1.9) и 2 – сейфертовскими галактиками первого типа с узкими линиями

(NLSy1). Природа этих источников ранее была неизвестна, при этом 15 из них раньше не были известны как рентгеновские источники. Полнота отождествления источников в каталоге первых пяти обзоров *CPT/ART-XC* доведена до 95%.

2. По данным телескопов *eROSITA* и *ART-XC* измеренные рентгеновские светимости для 39 активных ядер галактик (АЯГ) составляют от 10^{42} до 10^{45} эрг с^{-1} в диапазоне энергий 4–12 кэВ. У 15 объектов значения колонковой плотности газа, поглощающего рентгеновское излучение, составляют $N_{\text{H}} > 10^{22}$ атомов Н на кв. см., в том числе у пяти $N_{\text{H}} > 10^{23}$ см^{-2} . Источники SRGA J232446.8+440756, SRGA J000132.9+240237 являются кандидатами в комптоновски-толстые АЯГ ($N_{\text{H}} \gtrsim 10^{24}$ см^{-2}).
3. Массы чёрных дыр и эддингтоновские отношения для 18 объектов типов Sy1 и NLSy1 из выборки *CPT/ART-XC* составляют: $M_{\text{ВН}}$ от $\sim 5 \times 10^6 M_{\odot}$ до $\sim 7 \times 10^8 M_{\odot}$, λ_{Edd} от ~ 0.005 до ~ 0.2 (за исключением NLSy1 SRGA J224125.9+760343, у которого $\lambda_{\text{Edd}} \sim 1$, что согласуется с распространенным представлением о близком к критическому режиму аккреции в NLSy1).
4. Входящий в число новых рентгеновских источников обзора всего неба *CPT/ART-XC* объект SRGA J2306+1556 является радиогромким квазаром на $z = 0.4389$. Его рентгеновская светимость в максимуме кривой блеска в диапазоне энергий 2–10 кэВ составляет $\sim 6 \times 10^{45}$ эрг с^{-1} . Выявлено значительное внутреннее поглощение. Источник является уникальным на $z < 0.5$ (последние пять миллиардов лет космической истории) по сочетанию высокой светимости, сильного поглощения и радиогромкости, и поэтому представляет интерес для детального исследования физических процессов, происходящих в мощных квазарах.
5. По данным наблюдений телескопами *eROSITA*, *ART-XC* обсерватории *CPT* и обсерваторией *XMM-Newton* измеренный наклон рентгеновского континуума мощного квазара PG 1634+706 на $z = 1.337$ составляет $\Gamma = 1.8\text{--}2.0$, что соответствует значениям, характерным для активных ядер галактик меньшей светимости и не подтверждает предполагаемую тенденцию укрупнения рентгеновских спектров АЯГ с ростом светимости. Обнаружена широкая эмиссионная линия Fe K α , которая, вероятно, возникает в результате отражения излучения горячей короны от аккреционного диска. За всю 17-летнюю историю наблюдений квазара PG 1634+706 его рентгеновская светимость изменялась не более

чем в 2.5 раза, а амплитуды вариаций на масштабах недель и лет сопоставимы.

Личный вклад автора

Диссертант принимал активное участие в работе на всех ее этапах. Совместно с научным руководителем и соавторами диссертант участвовал в постановке задач, отборе кандидатов в активные ядра галактик для последующих наблюдений на оптических и рентгеновских телескопах, проводил наблюдения и обрабатывал полученные данные, занимался анализом полученных результатов и разработкой соответствующих алгоритмов. По результатам исследования было опубликовано шесть статей в рецензируемых журналах. В статьях №№2—6 диссертант выполнил основную работу (90% личного вклада в каждой статье), а в статье №1 доля личного вклада составляет 40%. Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад автора диссертационной работы является основным и определяющим.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Результаты диссертационной работы представлялись ее автором на семинарах отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН и в ГАИШ МГУ, а также на следующих конференциях:

1. XVIII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», доклад «Анализ рентгеновских спектров АЯГ по данным обсерватории SRG», 2021 г., Москва, Россия
2. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2021)», доклад «Открытие новых активных ядер галактик телескопом ART-XC им. Павлинского и их исследование по данным SRG/eROSITA, Саянского 1.6 м телескопа и Российско-турецкого 1.5м телескопа», 2021 г., Москва, Россия
3. XIX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», доклад «Оптическое отождествление источников SRG/ART-XC: от звезд Млечного Пути до активных ядер далеких галактик», 2022 г., Москва, Россия
4. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2022)», доклад «Яркий рентгеновский квазар

PG1634+706 по данным обсерватории СРГ», 2022 г., Москва, Россия

5. XX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», доклад «Яркий рентгеновский квазар PG1634+706 по данным обсерватории СРГ» 2023 г., Москва, Россия
6. Всероссийская конференция «Ультрафиолетовая Вселенная – 2023», доклад «Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и eROSITA в ходе первых пяти рентгеновских обзоров всего неба обсерватории СРГ», 2023 г., Москва, Россия
7. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2022)», доклад «Новые поглощенные активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и eROSITA в ходе обзора всего неба обсерватории СРГ», 2023 г., Москва, Россия
8. Всероссийская астрономическая конференция 2024 года «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», доклад «Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и eROSITA в ходе обзора всего неба обсерватории СРГ», 2024 г., п. Нижний Архыз, Россия

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 198 страниц, включая 31 рисунок и 21 таблицу. Список литературы содержит 174 наименования.

Содержание работы

Во **Введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, сформулированы цели работы, подчеркнуты элементы научной новизны и практической значимости полученных результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту. Отдельно указан личный вклад автора в проведенное исследование. Приведен список конференций, на которых докладывались промежуточные и итоговые результаты, а также перечислен список публикаций по теме диссертации и иные публикации. Описаны структура и содержание диссертации.

В **Главе 1** представлены результаты оптического отождествления кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом *ART-XC* обсерватории *СРГ* в ходе обзора всего неба.

В начале главы излагается принцип составления выборки исследуемых кандидатов в АЯГ: источники берутся из предварительных и итоговых каталогов *ART-XC*, причём их относительно малая численность позволяет

индивидуально отождествлять и исследовать каждый объект. После оптического отождествления, по возможности, используются данные *eROSITA* для уточнения положений рентгеновских источников, что обеспечивает локализацию в пределах нескольких угловых секунд.

Следующий раздел посвящён оптической спектроскопии кандидатов в АЯГ на телескопах 1.5-м класса: АЗТ-ЗЗИК (спектрограф АДАМ) и РТТ-150 (спектрограф TFOSC). Также описывается использование архивных спектров из обзора SDSS, а для южных объектов ($\delta < -20^\circ$) – из обзора 6dF. Приводятся характеристики приборов, излагается методика проведения наблюдений автором и его коллегами, а также процедура обработки оптических спектров.

Далее описывается, по каким данным обзоров *CPG* извлекались рентгеновские спектры *ART-XC* и *eROSITA*, и приводится единая процедура их извлечения и подготовки к анализу.

В разделе, посвящённом результатам, изложено, как измерялись характеристики оптических линий: потоки, эквивалентные ширины и физические ширины с учётом приборного уширения, а также красные смещения объектов. Затем описывается анализ рентгеновских спектров в программе XSPEC по данным телескопов *ART-XC* и *eROSITA*. В качестве основной принята модель степенного континуума с учётом фотопоглощения в Галактике и внутри АЯГ. У ряда объектов выявлен мягкий избыток излучения. Отмечается, что у части источников наблюдается существенное внутреннее поглощение $N_H > 10^{22} \text{ см}^{-2}$, а два источника являются кандидатами в комптоновски толстые АЯГ ($N_H > 10^{24} \text{ см}^{-2}$). По измеренным характеристикам оптических линий, а именно по наличию широких линий $H\alpha$, $H\beta$ и с помощью ВРТ-диаграммы (по отношениям потоков близких линий), выполняется классификация АЯГ. Для сейфертовских галактик 1-го типа приведены оценки масс черных дыр, полученные по светимости и ширине широких $H\alpha$ и $H\beta$, а также болометрические светимости и эддингтоновские отношения. Построена диаграмма N_H – Γ , демонстрирующая согласие между колонковой плотностью газа и оптическим типом. Также построена диаграмма зависимости ИК-цвета $W1 - W2$ от рентгеновской светимости в диапазоне 4–12 кэВ, на которой прослеживается корреляция. Для источников, детектируемых в радио, построена диаграмма светимость в рентгене – светимость в радио, из которой следует, что один из объектов является радиогромким.

В заключительном разделе подводятся итоги и обобщаются полученные результаты.

Глава 2 посвящена многоволновому исследованию квазара SRGA J2306+1556, открытого в ходе обзора всего неба *CPG/ART-XC*.

В начале главы формулируется задача и мотивируется исследование редкого источника SRGA J2306+1556 – мощного, радиогромкого и сильно поглощённого квазара на $z \simeq 0.44$.

В следующем разделе собрана информация по рентгеновским данным: описываются открытие источника в обзоре ARTSS1-2 и его основные характеристики. Затем приводится описание направленных квазиодновременных наблюдений телескопами *ART-XC* и *Swift*/XRT, позволивших уточнить положение источника на небе и исследовать его в широкополосном рентгеновском диапазоне (0.3–20 кэВ). Совместный спектральный анализ выявил существенное внутреннее поглощение $N_{\text{H}} \sim 2 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Признаков отражённой компоненты не обнаружено. Показано отсутствие быстрой переменности в диапазоне энергий 4–16 кэВ по данным *ART-XC*. Сравнение потоков, измеренных в ходе обзора всего неба и направленных наблюдений *ART-XC* показало, что рентгеновская светимость SRGA J2306+1556 менялась на порядок.

Далее исследуются многоволновые свойства источника. По архивным спектральным данным обзоров SDSS и DESI уточняется красное смещение, оптический тип объекта и проводится классификация с помощью BPT-диаграммы. Квазар исследуется по архивным многолетним данным в радиодиапазоне, переменность не выявлена. Радиоморфология соответствует классическому типу FR II: ядро и две протяжённые радиодоли, причём расстояние между горячими пятнами составляет $\sim 1 \text{ Мпк}$.

Затем строится спектральное распределение энергии (СПЭ) от радио до рентгеновского диапазона длин волн. Оценивается болометрическая светимость источника на основе шаблона СПЭ и фотометрии.

В следующем разделе рассматриваются свойства родительской галактики и центральной чёрной дыры: по фотометрическому моделированию и эмпирическим соотношениям оценивается масса ЧД и эддингтоновское отношение.

Далее SRGA J2306+1556 рассматривается в общем контексте населения квазаров на красных смещениях $z \lesssim 0.5$. Показано, что этот объект уникален по сочетанию рентгеновской светимости, поглощению и радиогромкости.

В заключении суммируются ключевые результаты и отмечается значение SRGA J2306+1556 как реперного объекта для изучения далеких поглощённых квазаров.

Глава 3 повествует о рентгеновских свойствах квазара PG 1634+706 по данным обсерваторий *CPT* и *XMM-Newton*.

В начале главы формулируется цель исследования: уточнить рентгеновские свойства одного из самых ярких квазаров по светимости – PG 1634+706 на $z = 1.337$ – и обсудить их в контексте физических свойств аккреционного диска и короны. Отмечаются его экстремальные рентгеновские и болометрическая светимости ($L_X \sim 10^{46} \text{ эрг с}^{-1}$, $L_{\text{bol}} \sim 10^{48} \text{ эрг с}^{-1}$).

Далее приводится описание рентгеновских наблюдений и процедуры извлечения спектров. Объект наблюдался во время фазы калибровочных

и пробных наблюдений обсерватории *СРГ*. Использованы почти синхронные наблюдения телескопов *СРГ/eROSITA*, *СРГ/ART-XC* и *XMM-Newton/EPN*, что позволило исследовать спектр и переменность при хорошей статистике.

В следующем разделе описывается анализ быстрой переменности источника по данным *СРГ/eROSITA* и *XMM-Newton/EPN*. Статистически значимой переменности внутри каждого наблюдения выявлено не было.

Затем описывается рентгеновский спектральный анализ отдельно по совместным данным *eROSITA* и *ART-XC* и по *EPN*. Рассмотрены модель поглощённого степенного континуума и модели с отражённой компонентой. На высоком уровне значимости обнаружена широкая (~ 1 кэВ) эмиссионная линия железа (6.4 кэВ).

Далее рассматривается долговременная эволюция PG 1634+706 за всё время наблюдений рентгеновскими обсерваториями, начиная с 1981 г., то есть в течение ~ 17 лет в системе покоя квазара. Амплитуда изменения светимости в диапазоне 2–10 кэВ составляет ~ 2.5 .

В заключении суммируются полученные результаты: наклон степенной компоненты $\Gamma = 1.8\text{--}1.9$, статистически значимая широкая линия Fe,K α при несущественном отражении в континууме, отсутствие быстрой переменности и умеренная долговременная изменчивость.

В **Заключении** отражается значение полученных в диссертации результатов для современной астрономии, их возможное применение и перспективы дальнейшего развития исследований.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия:

1. Зазнобин И. А., **Усков Г. С.**, Сазонов С. Ю., Буренин Р. А., Медведев П. С., Хорунжев Г. А., Ляпин А. Р., Кривонос Р. А., Филиппова Е. В., Гильфанов М. Р., Сюняев Р. А., Еселевич М. В., Бикмаев И. Ф., Иртуганов Э. Н., Николаева Е. А., Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М. Н. Павлинского обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора всего неба, Письма в Астрономический журнал, 2021, Т. 47, № 2, С. 89–106, EDN: QESCHOZ, Импакт-фактор 0.193 (РИНЦ). Личный вклад 40%. Объем 1.0 печатных листов.
Zaznobin, I. A., **Uskov, G. S.**, Sazonov, S. Yu., Burenin, R. A., Medvedev, P. S., Khorunzhev, G. A., Lyapin, A. R., Krivonos,

- R. A., Filippova, E. V., Gilfanov, M. R., Sunyaev, R. A., Eiselevich, M. V., Bikmaev, I. F., Irtuganov, E. N., and Nikolaeva, E. A., Optical Identification of Candidates for Active Galactic Nuclei Detected by the Mikhail Pavlinsky ART-XC Telescope Onboard the SRG Observatory during an All-Sky X-ray Survey, *Astronomy Letters*, 2021, Vol. 47, № 2, pp. 71-87, EDN: FXQNBL, Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 40%. Объем 0.95 печатных листов.
2. **Усков Г. С.**, Зазнобин И. А., Сазонов С. Ю., Семена А. Н., Гильфанов М. Р., Буренин Р. А., Еселевич М. В., Кривonos Р. А., Ляпин А. Р., Медведев П. С., Хорунжев Г. А., Сюняев Р. А., Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и eРОЗИТА обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора всего неба, *Письма в Астрономический журнал*, 2022, Т. 48, № 2, С. 95–118, EDN: EWXCHF, Импакт-фактор 0.193 (РИНЦ). Личный вклад 90%. Объем 1.29 печатных листов.
Uskov, G. S., Zaznobin, I. A., Sazonov, S. Yu., Semena, A. N., Gilfanov, M. R., Burenin, R. A., Eiselevich, M. V., Krivonos, R. A., Lyapin, A. R., Medvedev, P. S., Khorunzhev, G. A., and Sunyaev, R. A., New Active Galactic Nuclei Detected by the ART-XC and eROSITA Telescopes Onboard the SRG Observatory during an All-Sky X-ray Survey, *Astronomy Letters*, 2022, Vol. 48, № 2, p. 87-108, EDN: DMCQKG, Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 90%. Объем 1.24 печатных листов.
 3. **Усков Г. С.**, Сазонов С. Ю., Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Гильфанов М. Р., Медведев П. С., Сюняев Р. А., Кривonos Р. А., Филишова Е. В., Хорунжев Г. А., Еселевич М. В., Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и eРОЗИТА в ходе первых пяти рентгеновских обзоров всего неба обсерватории СРГ, *Письма в Астрономический журнал*, 2023, Т. 49, № 2, С. 97–121, EDN: PZLSPL, Импакт-фактор 0.193 (РИНЦ). Личный вклад 90%. Объем 1.33 печатных листов.
Uskov, G. S., Sazonov, S. Yu., Zaznobin, I. A., Burenin, R. A., Gilfanov, M. R., Medvedev, P. S., Sunyaev, R. A., Krivonos, R. A., Filippova, E. V., Khorunzhev, G. A., and Eiselevich, M. V., New Active Galactic Nuclei Detected by the ART-XC and eROSITA Telescopes during the First Five SRG All-Sky X-ray Surveys, *Astronomy Letters*, 2023, Vol. 49, № 2, p. 25-48. EDN: VFZJYO, Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 90%. Объем 1.28 печатных листов.
 4. **Усков Г. С.**, Сазонов С. Ю., Гильфанов М. Р., Лапшов И. Ю., Сюняев Р. А., Рентгеновские свойства мощного квазара PG 1634+706

на $z = 1.337$ по данным обсерваторий СРГ и ХММ им. Ньютона, Письма в Астрономический журнал, 2023, Т. 49, № 11, С. 717–734, EDN: RYAUQD, Импакт-фактор 0.193 (РИНЦ). Личный вклад 90%. Объем 1.11 печатных листов.

Uskov, G. S., Sazonov, S. Yu., Gilfanov, M. R., Lapshov, I. Yu., and Sunyaev, R. A., X-ray Properties of the Luminous Quasar PG 1634+706 at $z=1.337$ from SRG and XMM-Newton Data, Astronomy Letters, 2023, Vol. 49, № 11, p. 621-638, EDN: DOOKID, Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 90%. Объем 1.09 печатных листов.

5. **Усков Г. С.**, Сазонов С. Ю., Зазнобин И. А., Гильфанов М. Р., Буренин Р. А., Филиппова Е. В., Медведев П. С., Москалева А. В., Сюняев Р. А., Кривonos Р. А., Еселевич М. В., Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и ePOZITA в ходе первых пяти рентгеновских обзоров всего неба обсерватории СРГ. Часть 2, Письма в Астрономический журнал, 2024, Т. 50, № 5, С. 339–360, EDN: MYINKY, Импакт-фактор 0.193 (РИНЦ). Личный вклад 90%. Объем 1.24 печатных листов.

Uskov, G. S., Sazonov, S. Yu., Zaznoblin, I. A., Gilfanov, M. R., Burenin, R. A., Filippova, E. V., Medvedev, P. S., Moskaeva, A. V., Sunyaev, R. A., Krivonos, R. A., and Eselevich, M. V., New Active Galactic Nuclei Detected by the ART-XC and eROSITA Telescopes during the First Five SRG All-Sky X-ray Surveys. Part 2, Astronomy Letters, 2024, Vol. 50, № 5, p. 279-301, EDN: FNQAIJ, Импакт-фактор 0.20 (JCI). Личный вклад 90%. Объем 1.21 печатных листов.

6. **Uskov G. S.**, Sazonov S., Lapshov I., Mikhailov A. G., Filippova E., Lutovinov A., Mereminskiy I. A., Mochalina M., Semena A., Tkachenko A., SRGA J2306+1556: an extremely X-ray luminous, heavily obscured, radio-loud quasar at $z = 0.44$ discovered by SRG/ART-XC, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2025, Vol. 540, No. 4, P. 3170–3185, DOI: 10.1093/mnras/staf924 (EDN не известен), Импакт-факт 1.03 (JCI). Личный вклад 80%. Объем 1.75 печатных листов.

Список литературы

1. *Soltan A.* Masses of quasars. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1982. — июля. — Vol. 200. — Pp. 115–122.
2. *Yu Qingjuan, Tremaine Scott.* Observational constraints on growth of massive black holes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. —

2002. — октября. — Vol. 335, no. 4. — Pp. 965–976.
3. *Sazonov S. Yu., Ostriker J. P., Sunyaev R. A.* Quasars: the characteristic spectrum and the induced radiative heating // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2004. — jan. — Vol. 347, no. 1. — Pp. 144–156.
 4. *Hickox Ryan C., Alexander David M.* Obscured Active Galactic Nuclei // *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — sep. — Vol. 56. — Pp. 625–671.
 5. *Hasinger G.* Absorption properties and evolution of active galactic nuclei // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — nov. — Vol. 490, no. 3. — Pp. 905–922.
 6. The incidence of obscuration in active galactic nuclei / A. Merloni, A. Bongiorno, M. Brusa et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — feb. — Vol. 437, no. 4. — Pp. 3550–3567.
 7. Toward the Standard Population Synthesis Model of the X-Ray Background: Evolution of X-Ray Luminosity and Absorption Functions of Active Galactic Nuclei Including Compton-thick Populations / Yoshihiro Ueda, Masayuki Akiyama, Günther Hasinger et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — may. — Vol. 786, no. 2. — P. 104.
 8. *Sazonov S., Churazov E., Krivonos R.* Does the obscured AGN fraction really depend on luminosity? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — dec. — Vol. 454, no. 2. — Pp. 1202–1220.
 9. BASS XXXVII: The Role of Radiative Feedback in the Growth and Obscuration Properties of Nearby Supermassive Black Holes / C. Ricci, T. T. Ananna, M. J. Temple et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2022. — oct. — Vol. 938, no. 1. — P. 67.
 10. The central dusty torus in the active nucleus of NGC 1068 / W. Jaffe, K. Meisenheimer, H. J. A. Röttgering et al. // *Nature*. — 2004. — мая. — Vol. 429, no. 6987. — Pp. 47–49.
 11. Spatially resolved rotation of the broad-line region of a quasar at sub-parsec scale / Gravity Collaboration, E. Sturm, J. Dexter et al. // *Nature*. — 2018. — ноября. — Vol. 563, no. 7733. — Pp. 657–660.
 12. An image of the dust sublimation region in the nucleus of NGC 1068 / GRAVITY Collaboration, O. Pfuhl, R. Davies et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — февраля. — Vol. 634. — P. A1.
 13. *Sunyaev R. A., Titarchuk L. G.* Comptonization of X-Rays in Plasma Clouds - Typical Radiation Spectra // *Astronomy & Astrophysics*. — 1980. — июня. — Vol. 86. — P. 121.

14. *Haardt F., Maraschi L.* A Two-Phase Model for the X-Ray Emission from Seyfert Galaxies // *The Astrophysical Journal Letters*. — 1991. — октябрь. — Vol. 380. — P. L51.
15. The ROSAT all-sky survey bright source catalogue / W. Voges, B. Aschenbach, Th. Boller et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1999. — сентябрь. — Vol. 349. — Pp. 389–405.
16. Second ROSAT all-sky survey (2RXS) source catalogue / Th. Boller, M. J. Freyberg, J. Trümper et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — апрель. — Vol. 588. — P. A103.
17. The eROSITA X-ray telescope on SRG / P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — 02. — Vol. 647. — P. A1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202039313>.
18. SRG X-ray orbital observatory. Its telescopes and first scientific results / R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — dec. — Vol. 656. — P. A132.
19. The 157 Month Swift/BAT All-sky Hard X-Ray Survey / Amy Y. Lien, Hans A. Krimm, Craig B. Markwardt et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2025. — август. — Vol. 989, no. 2. — P. 161.
20. INTEGRAL/IBIS 17-yr hard X-ray all-sky survey / Roman A. Krivonos, Sergey Yu Sazonov, Ekaterina A. Kuznetsova et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — март. — Vol. 510, no. 4. — Pp. 4796–4807.
21. SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first five surveys / S. Sazonov, R. Burenin, E. Filippova et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2024. — jul. — Vol. 687. — P. A183.
22. The ART-XC telescope on board the SRG observatory / M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — 06. — Vol. 650. — P. A42. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202040265>.