

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

Москва — 2025

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Актуальность темы исследования	5
Цель и задачи диссертационной работы	8
Научная новизна	9
Научная и практическая значимость	9
Основные положения, выносимые на защиту:	10
Личный вклад автора	12
Список публикаций по теме диссертации	12
Апробация работы	15
Структура и содержание диссертации	16
 Глава 1. Отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом <i>ART-XC</i> им. М.Н. Павлинского обсерватории <i>СРГ</i> в ходе рентгеновского обзора всего неба, и исследование их физических свойств	21
1.1 Введение	21
1.2 Выборка объектов	24
1.3 Оптические наблюдения	29
1.3.1 Наблюдения на российских телескопах	33
1.3.2 Архивные данные обзоров SDSS и 6dF	35
1.4 Рентгеновские наблюдения	38
1.4.1 Извлечение спектров <i>ART-XC</i>	39
1.4.2 Извлечение спектров <i>eROSITA</i>	39
1.5 Результаты	40
1.5.1 Оптические спектры	40
1.5.2 Рентгеновские спектры	57
1.5.3 Классификация объектов	72
1.5.4 Оценка масс черных дыр и темпов аккреции	76

1.5.5	Наклон рентгеновского континуума и внутреннее поглощение	80
1.5.6	Многоволновые свойства объектов	83
1.6	Заключение	88

Глава 2. SRGA J2306+1556: мощный рентгеновский,

радиогромкий, сильно поглощенный квазар на

$z=0.44$, обнаруженный обсерваторией CPG 92

2.1	Введение	92
2.2	Рентгеновские наблюдения	94
2.2.1	Открытие и наблюдения во время обзора всего неба CPG/ART-XC	94
2.2.2	Направленные наблюдения CPG/ART-XC	95
2.2.3	Направленные наблюдения Swift/XRT	97
2.2.4	Рентгеновский спектр	98
2.2.5	Быстрая переменность	104
2.2.6	Долговременная переменность	106
2.3	Многоволновые наблюдения	110
2.3.1	Оптические спектры	115
2.3.2	Радионаблюдения	121
2.4	Спектральное распределение энергии	127
2.5	Родительская галактика и центральная черная дыра	131
2.6	SRGA J2306+1556 в контексте населения квазаров	133
2.7	Заключение	137

Глава 3. Рентгеновские свойства мощного квазара

PG 1634+706 на $z=1.337$ по данным обсерваторий

CPG и XMM им. Ньютона 138

3.1	Введение	138
3.2	Наблюдения и анализ данных	140
3.2.1	CPG/eROSITA	142
3.2.2	CPG/ART-XC	143
3.2.3	XMM-Newton/EPN	144
3.3	Быстрая переменность	145

	Стр.
3.4 Рентгеновский спектр	147
3.5 Долговременная эволюция	157
3.6 Заключение	161
Заключение	164
Список литературы	165
Приложение А. Спектральные особенности источников	185

Введение

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 изображе-

ния 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 М87) – 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 обзоров (на энергиях ниже 2 кэВ), таких как обзор обсерватории ROSAT [15;16] и более современный обзор телескопа *eROSITA* [17] обсерватории *СПГ* [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 *СПГ*. 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 ($N_H \sim 10^{22}$ – 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

привлекать данные других рентгеновских телескопов, в частности, телескопа *eROSITA* обсерватории *СПГ*, 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 *СПГ*, 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 *СПГ* 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 *CPI*. 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 ($N_{\text{H}} \sim 2 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$) 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 *CPI* (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 *CPI/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 *CPI/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-ЗЗИК и РТТ-150 и анализа архивных спектров 6dF и SDSS установлено, что 48 рентгеновских источников из обзора *CPI/ART-XC* являются сейфертовскими галактиками разных типов в диапазоне красных смещений $z = 0.014\text{--}0.283$: 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 $N_{\text{H}} > 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Источники SRGA J232446.8+440756, SRGA J000132.9+240237 являются кандидатами в комптоновски-толстые АЯГ ($N_{\text{H}} \gtrsim 10^{24} \text{ см}^{-2}$).
3. Массы чёрных дыр и эддингтоновские отношения для 18 объектов типов Sy1 и NLSy1 из выборки *CPT/ART-XC* составляют: M_{BH} 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.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра ПИНЦ «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: QECHOZ, 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., Eselevich, 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: FXQNB�, 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., Кривонос 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., Eselevich, 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., Кривонос Р. А., Филиппова Е. В., Хорунжев Г. А., Еселевич М. В., Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и ePOZITA 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 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, 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., Кривонос 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., Zaznobin, I. A., Gilfanov, M. R., Burenin, R. A., Filippova, E. V., Medvedev, P. S., Moskaleva, 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.

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 СРГ», 2021 г., Москва, Россия
2. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2021)», доклад «Открытие новых активных ядер галактик

- телескопом АРТ-ХС им. Павлинского и их исследование по данным СРГ/еРОЗИТА, 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 СРГ/АРТ-ХС: от звезд Млечного Пути до активных ядер далеких галактик», 2022 г., Москва, Россия
 4. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-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 (НЕА-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

Структура и содержание диссертации

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

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 *CPI* 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 *CPI* 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 $N_H > 10^{22}$

см^{-2} , а два источника являются кандидатами в комптоновски толстые АЯГ ($N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ см}^{-2}$). 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 $N_{\text{H}}-\Gamma$, 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 *CPI/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 ВРТ-диаграммы. Квазар исследуется по архивным многолетним данным в радиодиапазоне,

переменность не выявлена. Радиоморфология соответствует классическому типу FRII: ядро и две протяжённые радиодоли, причём расстояние между горячими пятнами составляет ~ 1 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 ($L_X \sim 10^{46}$ эрг с $^{-1}$, $L_{\text{bol}} \sim 10^{48}$ эрг с $^{-1}$).

Далее приводится описание рентгеновских наблюдений и процедуры извлечения спектров. Объект наблюдался во время фазы калибровочных и пробных наблюдений обсерватории *CPT*. Использованы почти синхронные наблюдения телескопов *CPT/eROSITA*, *CPT/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 *CPT/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.

Глава 1. Отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом *ART-XC* им. М.Н. Павлинского обсерватории *СРГ* в ходе рентгеновского обзора всего неба, и исследование их физических свойств

Данная глава основана на работах 1,2,3,5 из списка публикаций по теме диссертации.

1.1 Введение

Орбитальная обсерватория Спектр–Рентген–Гамма (*СРГ*) [23] начиная с 12 декабря 2019 г. проводит обзор всего неба в рентгеновских лучах с перерывами на наблюдения отдельных астрофизических объектов и площадок на небе. На борту космического аппарата находятся два телескопа с рентгеновской оптикой косого падения: *eROSITA* [17] и *ART-XC* им. Павлинского [22], работающие в диапазонах энергий 0.2–8 кэВ и 4–30 кэВ соответственно. В июне 2020 года обсерватория завершила первый обзор всего неба, в декабре 2020 г. – второй, в июне 2021 г. – третий, в декабре 2021 г. – четвертый, а в марте 2022 г. – около 40% пятого обзора. Затем телескоп *ART-XC* в течение полутора лет проводил глубокий обзор плоскости Галактики и ее центральной части, а в октябре 2023 г. возобновил сканирование всего неба¹.

По мере накопления и обработки данных регулярно обновляются каталоги источников, зарегистрированных телескопами *ART-XC* и *eROSITA* в ходе обзора всего неба. Первый официальный каталог источников, зарегистрированных телескопом *ART-XC*, был составлен по данным первых двух обзоров (*ARTSS1-2*, [24]), а недавно был выпущен второй официальный каталог источников *ART-XC*, в который вошли данные первых четырех и неполного пятого обзоров (*ARTSS1-5*, [21]). Для регистрации источников в обзоре всего неба *ART-XC* используется диапазон энергий 4–12 кэВ. В случае телескопа *eROSITA* основным является мягкий рентгеновский диапазон 0.2–2.3 кэВ, но регистра-

¹Телескоп *eROSITA* находится в спящем режиме с 26 февраля 2022 г.

ция источников производится также и в более жестких поддиапазонах вплоть до 8 кэВ.

Из-за того, что спектры рентгеновских источников, как правило, спадают с энергией выше $\sim 2\text{--}3$ кэВ по степенному или даже экспоненциальному закону, число источников, зарегистрированных во время обзора всего неба телескопами *eROSITA* и *ART-XC* значительно различается: каталог *eROSITA* в диапазоне 0.2–2.3 кэВ содержит 3–4 миллиона источников (суммарно на восточной и западной галактических половинах неба, за обработку данных на которых отвечают соответственно российские и германские ученые), а каталог *ART-XC* в диапазоне 4–12 кэВ – около 1500 источников. Сравнительно небольшой размер каталога *ART-XC* позволяет поставить задачу об отождествлении и индивидуальном исследовании всех источников, входящих в него (в том числе тех, которые не были известны ранее). Для каталога *eROSITA* такая задача потребовала бы огромных усилий и не является абсолютно необходимой, так как каталоги такого большого размера обычно исследуются другими методами. Вместе с тем, данные *eROSITA* позволяют во многих случаях уточнить положения на небе источников из каталога *ART-XC* и дают дополнительную информацию об их спектрах в мягком рентгеновском диапазоне.

По мере обновления каталогов мы сопоставляли актуальную рабочую версию каталога источников *ART-XC* с:

- каталогами источников, обнаруженных в предыдущих рентгеновских обзорах неба;
- предварительным каталогом источников, обнаруженных телескопом *eROSITA* в мягком рентгеновском диапазоне на восточной галактической половине небесной сферы ($0 < l < 180^\circ$);
- каталогами астрофизических объектов в других диапазонах длин волн.

В результате формировались списки как новых источников, открытых телескопом *ART-XC*, так и ранее известных рентгеновских источников, подтверждённых с помощью *ART-XC*, природа которых была неизвестна или плохо изучена. Большинство этих объектов зарегистрированы также телескопом *eROSITA*.

Для установления или уточнения природы рентгеновских источников из обзора всего неба *ART-XC* проводились спектроскопические наблюдения на наземных оптических телескопах и анализировались общедоступные архивные данные. Эта работа началась практически одновременно с обзором всего неба обсерватории *CPI* и проводится с помощью 1.6-м телескопа АЗТ-ЗЗИК Са-

янской обсерватории ИСЗФ СО РАН и 1.5-м Российско-турецкого телескопа (РТТ-150), которые входят в комплекс наземной поддержки обсерватории *СРГ*. Кроме того, мы использовали архивные данные таких обзоров, как SDSS, 6dF и DESI.

Таким образом, оптические наблюдения и публикация их результатов велись параллельно с процессом составления и обновления каталогов рентгеновских источников обзора всего неба *СРГ/ART-XC*. Большинство исследованных объектов оказались активными ядрами галактик (остальные объекты имеют происхождение в Галактике, а именно являются катаклизмическими переменными [25] или рентгеновскими двойными системами с нейтронной звездой или чёрной дырой [26; 27]), и именно они являются предметом диссертационной работы. На текущий момент нами опубликованы результаты отождествления четырех подвыборок АЯГ, каждой из которой была посвящена отдельная статья, а именно:

- После первого обзора *СРГ* были отождествлены и классифицированы 6 АЯГ из предварительного каталога *ART-XC* (выборка №1, [25]). Отметим, что в статье [25] обсуждались еще два объекта – SRGA J005751.0+210846 и SRGA J014157.0–032915. Они были зарегистрированы телескопом *ART-XC* на невысоком уровне значимости, при этом не детектировались телескопом *eROSITA*, и, согласно полученным нами оптическим спектрам их предполагаемых компаньонов, не удовлетворяют стандартным критериям АЯГ, основанным на потоках эмиссионных линий. Из-за недостаточных доказательств в реальности и происхождении этих рентгеновских источников мы не включили их в текущую выборку.
- После второго обзора *СРГ* – 17 АЯГ из каталога ARTSS1-2 (выборка №2, [28]).
- После четвёртого и частично выполненного пятого обзоров *СРГ* – 14 АЯГ из предварительной версии каталога ARTSS1-5 (выборка №3, [29]).
- И наконец, по данным опубликованного каталога ARTSS1-5 были представлены результаты еще для 11 АЯГ (выборка №4, [30]).

Таким образом, всего нам удалось отождествить и классифицировать 48 АЯГ, зарегистрированных в ходе рентгеновского обзора всего неба телескопом *ART-XC*, причем эта выборка продолжает пополняться. Помимо обработки и анализа оптических спектров мы исследовали рентгеновские спектры этих объ-

ектов, используя данные телескопов *eROSITA* и *ART-XC*. В настоящей главе представлены и обобщены результаты этой работы.

Для расчёта светимостей ниже используется модель плоской Вселенной с параметрами $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$.

1.2 Выборка объектов

Таблица 1.1 — Выборка рентгеновских источников, оказавшихся активными ядрами галактик

Источник <i>ART-XC</i>	Источник ARTSS1-5	Источник <i>eROSITA</i>	α	δ	Открыт
Выборка №1					
SRGA J043209.6+354917	SRGA J043208.9+354922	SRGe J043208.3+354921	68.03333	35.824722	<i>ROSAT</i>
SRGA J045049.8+301449	SRGA J045048.9+301443	SRGe J045048.5+301500	72.70000	30.250833	<i>Swift</i>
SRGA J152102.3+320418	SRGA J152102.1+320410	SRGe J152102.0+320420	230.25750	32.070556	<i>Swift</i>
SRGA J200431.6+610211	SRGA J200431.2+610218	SRGe J200431.7+610232	301.13500	61.041944	<i>ROSAT</i>
SRGA J224125.9+760343	—	SRGe J224128.0+760356	340.35750	76.064722	<i>ROSAT</i>
SRGA J232446.8+440756	—	—	351.20167	44.132500	<i>CPI</i>
Выборка №2					
SRGA J025234.3+431004	SRGA J025234.6+431001	см. под таблицей	43.14170	43.167400	<i>Swift</i>
SRGA J062627.2+072734	SRGA J062627.7+072726	DE	96.61250	7.458060	<i>ROSAT</i>
SRGA J070636.4+635109	SRGA J070637.0+635109	SRGe J070634.9+635056	106.64500	63.848890	<i>CPI</i>
SRGA J092021.6+860249	—	SRGe J092016.6+860302	140.06973	86.050120	<i>ROSAT</i>
SRGA J195702.4+615036	SRGA J195702.7+615028	SRGe J195702.4+615034	299.26000	61.843060	<i>ROSAT</i>
SRGA J221913.2+362014	SRGA J221913.5+362004	SRGe J221914.6+362005	334.81050	36.336300	<i>CPI</i>
SRGA J223714.9+402939	SRGA J223715.8+402944	SRGe J223715.4+402943	339.31458	40.495830	<i>ROSAT</i>
SRGA J232037.8+482329	SRGA J232038.1+482320	SRGe J232039.5+482329	350.16417	48.390560	<i>ROSAT</i>
SRGA J235250.6–170449	SRGA J235250.7–170448	SRGe J235251.4–170438	358.21417	-17.076940	<i>Swift</i>
SRGA J030838.1–552041	SRGA J030838.7–552042	DE	47.15875	-55.344720	<i>CPI</i>
SRGA J052959.8–340157	SRGA J052959.2–340205	DE	82.49669	-34.032930	<i>XMM-Newton</i>
SRGA J055053.7–621457	SRGA J055052.7–621453	DE	87.72339	-62.248630	<i>ROSAT</i>
SRGA J060241.1–595152	SRGA J060241.7–595155	DE	90.67472	-59.864560	<i>XMM-Newton</i>
SRGA J061322.9–290027	SRGA J061324.1–290027	DE	93.35120	-29.006330	<i>ROSAT</i>
SRGA J063324.9–561424	SRGA J063326.9–561425	DE	98.36091	-56.239140	<i>ROSAT</i>
SRGA J064421.5–662620	SRGA J064421.9–662623	DE	101.09111	-66.438860	<i>ROSAT</i>
SRGA J072823.5–440823	—	DE	112.09742	-44.140050	<i>ROSAT</i>

Продолжение таблицы 1.1

Источник <i>ART-XC</i>	Источник ARTSS1-5	Источник <i>eROSITA</i>	α	δ	Открыт
Выборка №3					
SRGA J001439.6+183503	SRGA J001439.6+183500	SRGe J001440.7+183457	3.66712	18.582030	<i>XMM</i> and <i>Swift</i>
SRGA J002240.8+804348	SRGA J002241.4+804348	SRGe J002243.6+804347	5.68204	80.729470	<i>ROSAT</i>
SRGA J010742.9+574419	SRGA J010743.0+574423	SRGe J010743.0+574420	16.92964	57.738250	<i>CPI</i>
SRGA J021227.3+520953	—	SRGe J021226.6+520954	33.11032	52.164830	<i>ROSAT</i>
SRGA J025208.4+482955	SRGA J025208.6+482952	SRGe J025209.8+482960	43.04017	48.499830	<i>ROSAT</i>
SRGA J045432.1+524003	SRGA J045431.4+524008	SRGe J045431.8+524008	73.63262	52.668470	<i>CPI</i>
SRGA J051313.5+662747	SRGA J051313.8+662746	SRGe J051316.6+662751	78.31846	66.463980	<i>Swift</i>
SRGA J110945.8+800815	SRGA J110946.0+800817	SRGe J110944.2+800807	167.43237	80.134890	<i>CPI</i>
SRGA J161251.4−052100	SRGA J161251.4−052105	SRGe J161251.1−052118	243.21342	-5.354850	<i>ROSAT</i>
SRGA J161943.7−132609	SRGA J161944.1−132618	SRGe J161944.2−132616	244.93354	-13.437810	<i>CPI</i>
SRGA J182109.8+765819	SRGA J182111.0+765816	SRGe J182111.8+765817	275.29846	76.971390	<i>CPI</i>
SRGA J193707.6+660816	SRGA J193707.1+660811	SRGe J193708.1+660821	294.28417	66.139250	<i>ROSAT</i>
SRGA J200331.2+701332	SRGA J200331.8+701331	SRGe J200333.8+701336	300.89162	70.226920	<i>ROSAT</i>
SRGA J211149.5+722815	SRGA J211148.9+722812	SRGe J211151.0+722816	317.96575	72.471220	<i>CPI</i>
Выборка №4					
SRGA J000132.9+240237	SRGA J000132.9+240237	SRGe J000132.4+240229	0.38474	24.041770	<i>CPI</i>
SRGA J001059.5+424341	—	SRGe J001059.5+424351	2.74883	42.731330	<i>CPI</i>
SRGA J023800.1+193818	SRGA J023800.1+193818	SRGe J023800.0+193811	39.50000	19.636610	<i>ROSAT</i>
SRGA J025900.3+502958	SRGA J025900.3+502958	SRGe J025901.0+503013	44.75421	50.504080	<i>CPI</i>
SRGA J040335.6+472440	SRGA J040335.6+472440	SRGe J040336.4+472439	60.90171	47.410700	<i>ROSAT</i>
SRGA J165143.2+532539	SRGA J165143.2+532539	SRGe J165144.1+532539	252.93225	53.427720	<i>Einstein</i>
SRGA J181749.5+234311	SRGA J181749.5+234311	SRGe J181749.1+234313	274.45412	23.720190	<i>CPI</i>
SRGA J191628.1+711619	SRGA J191628.1+711619	SRGe J191629.4+711614	289.12188	71.271220	<i>ROSAT</i>
SRGA J194412.5−243619	SRGA J194412.5−243619	SRGe J194412.5−243623	296.05168	-24.605900	<i>XMM</i>

Продолжение таблицы 1.1

Источник <i>ART-XC</i>	Источник ARTSS1-5	Источник <i>eROSITA</i>	α	δ	Открыт
SRGA J195226.6+380011	SRGA J195226.6+380011	SRGe J195225.4+380028	298.10454	38.007480	<i>ROSAT</i>
SRGA J201633.2+705525	SRGA J201633.2+705525	SRGe J201632.4+705525	304.13587	70.924220	<i>CPI</i>

Столбец 1: название источника на момент публикации выборки. Столбец 2: название источника в каталоге ARTSS1-5. Столбец 3: название источника в каталоге российской половины неба *eROSITA*. Если нет соответствия в этом каталоге, то ставится прочерк. Источник SRGA J025234.3+431004 не детектируется в стандартном диапазоне 0.3–2.3 кэВ, который используется для построения каталога *eROSITA*, однако регистрируется телескопом *eROSITA* на энергиях выше 2.3 кэВ. Для источников *ART-XC* на немецкой половине неба *eROSITA* (где соответствие не проверялось) ставится "DE". Столбец 4, 5: прямое восхождение и склонение оптического компаньона. Столбец 6: орбитальная обсерватория, впервые обнаружившая рентгеновский источник.

Как уже отмечалось выше, по мере проведения обзора всего неба телескопом *ART-XC* им. Павлинского регулярно обновлялись каталоги источников, зарегистрированных в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Поэтому разные исследованные нами выборки кандидатов в АЯГ соответствуют разным версиям каталогов *ART-XC*. Ниже приведены критерии отбора для каждой из выборок.

- Для выборки №1 [25] отбирались точечные источники на восточной галактической половине неба ($0 < l < 180^\circ$) из внутреннего каталога первого полугодового обзора *ART-XC* с отношением сигнал/шум $S/N \geq 4.5$.
- В выборку №2 [28] попали объекты из опубликованного каталога первых двух обзоров (ARTSS1-2). Рассматривались точечные источники, задетектированные на уровне значимости не ниже 4.82 стандартных отклонений. Из 17 объектов восемь находятся на восточной галактической половине неба. Для них нам были доступны данные наблюдений *eROSITA*, по которым мы провели анализ рентгеновских спектров. Данные телескопа *eROSITA* для остальных девяти источников принадлежат немецкому консорциуму *CPI/eROSITA*, поэтому для них мы провели только оптическое отождествление.
- Выборка №3 [29] формировалась из предварительной версии каталога ARTSS1-5 (первые ~ 4.4 обзора *ART-XC*). Отбирались точечные источники, зарегистрированные на уровне $S/N \geq 4.5$ на восточной галактической половине неба.
- Для выборки №4 [30] использовались объекты на восточной галактической половине неба из рабочей версии каталога ARTSS1-5. Однако после завершения работы над этим каталогом один из попавших в выборку №4 объектов (SRGA J001059.5+424341) не вошёл в официальный список [21] из-за принятого решения немного поднять порог регистрации источников ($S/N \geq 5.3$ по методу максимального правдоподобия).

В таблице 1.1 представлен полный перечень источников из выборок №№1-4, с указанием их названий в каталогах *ART-XC* и *eROSITA*, координат оптических компаньонов и орбитальных обсерваторий, впервые обнаруживших эти рентгеновские источники. Природа источников, открытых другими рентгеновскими обсерваториями еще до обзора всего неба обсерватории *CPI*, была неизвестна или плохо изучена до нашего исследования. Как видно из таблицы, некоторые источники из первых исследованных нами выборок не попали в опубли-

ликованный позднее каталог источников ARTSS1-5. Это связано, во-первых, с тем, что активные ядра галактик являются переменными рентгеновскими источниками, из-за чего объект мог быть ярким в первых полугодовых обзорах *CPG*, а затем стал более тусклым и перестал детектироваться по сумме данных четырех или пяти обзоров. Кроме того, в разных версиях каталогов *ART-XC* использовались разные пороги детектирования источников (соответствующие разным допустимым долям ложных детектирований).

Всего с помощью оптической спектроскопии было отождествлено 48 АЯГ. Для 39 из них были также проанализированы широкополосные рентгеновские спектры в диапазоне 0.2–20 кэВ по данным телескопов *eROSITA* и *ART-XC*. Важно подчеркнуть, что данные *eROSITA* (при наличии) использовались нами только для уточнения положений рентгеновских источников и анализа рентгеновских спектров уже после того, как было проведено оптическое отождествление объектов. Первичный отбор вероятных оптических компаньонов внутри областей локализации источников *ART-XC* производился с учетом многоволновой фотометрической информации и не является предметом настоящей диссертационной работы.

На рисунках 1.1, 1.2 показаны оптические изображения исследуемых объектов и соответствующие области локализации рентгеновских источников по данным *ART-XC* и *eROSITA* (если имеются). С каждым рентгеновским источником можно однозначно связать оптический объект, причем в большинстве случаев на изображении можно различить галактику.

1.3 Оптические наблюдения

Спектроскопия объектов северного неба ($\delta > -20^\circ$) проводилась нами на телескопах РТТ-150 и АЗТ-33ИК, кроме того в одном случае использовались архивные данные обзора SDSS [33]; для объектов южного неба ($\delta < 0^\circ$) использовались архивные данные обзора 6dF [34] – см. журнал наблюдений в табл. 1.2. Ниже кратко описываются использованные телескопы и инструменты, а также методики проведения и обработки наблюдений.

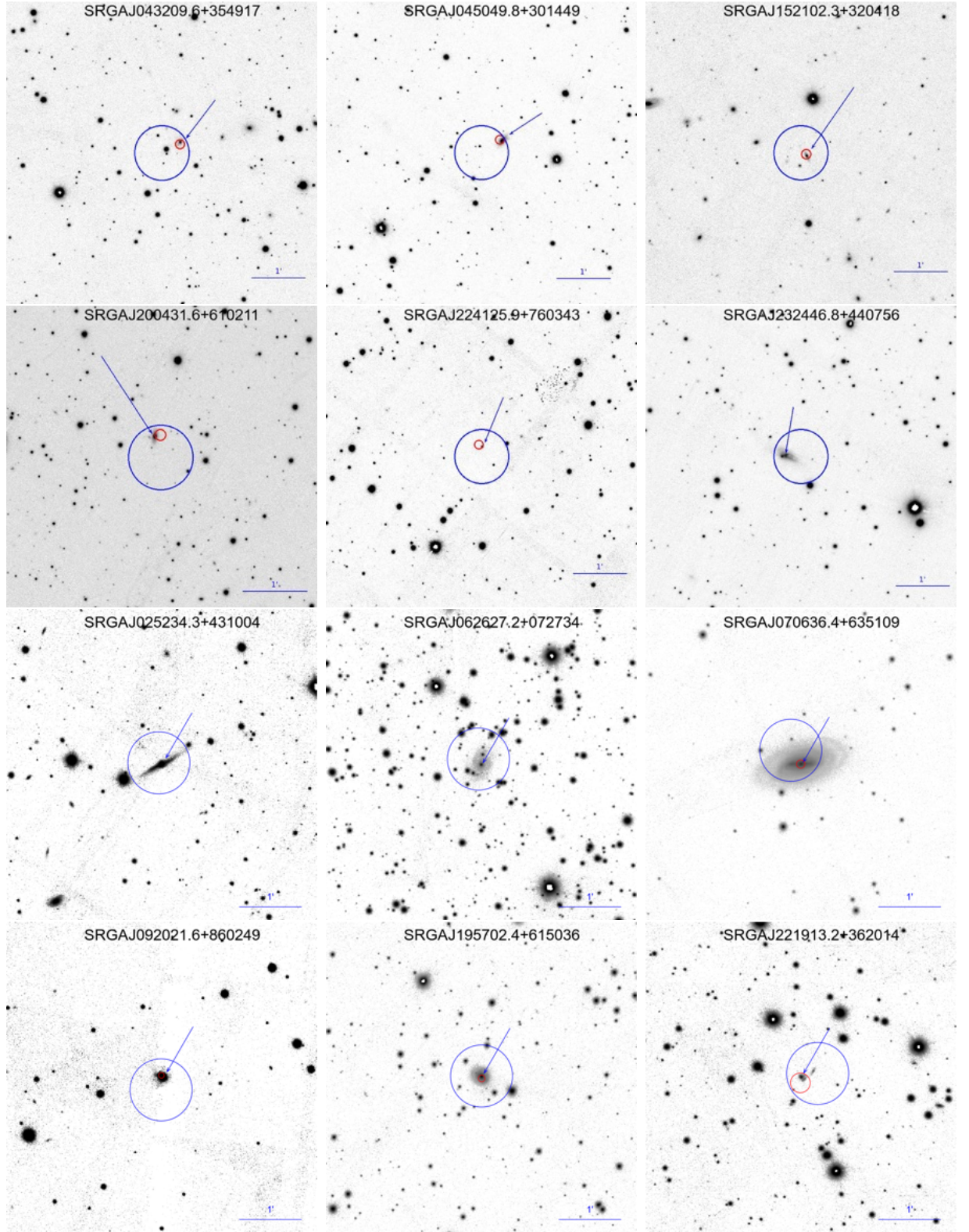


Рисунок 1.1 — Оптические изображения в фильтре r из обзора PanSTARRS PS1 [31]. Большими и маленькими кружками показаны области локализации рентгеновских источников телескопами *ART-XC* и *eROSITA*. Стрелками показаны оптические объекты, спектры которых исследовались нами. Горизонтальный отрезок показывает угловой размер в $1'$.

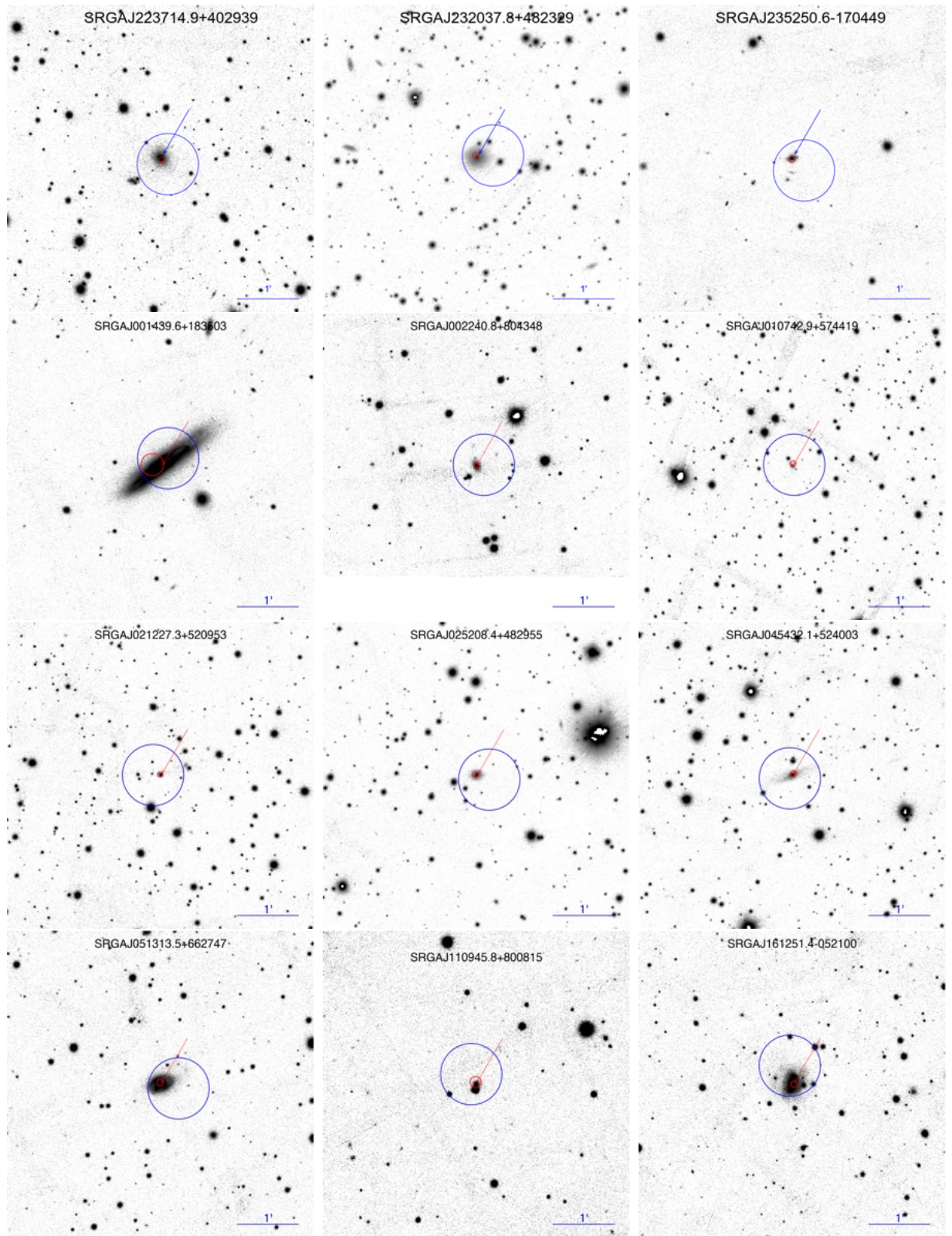


Рисунок 1.1 — Продолжение

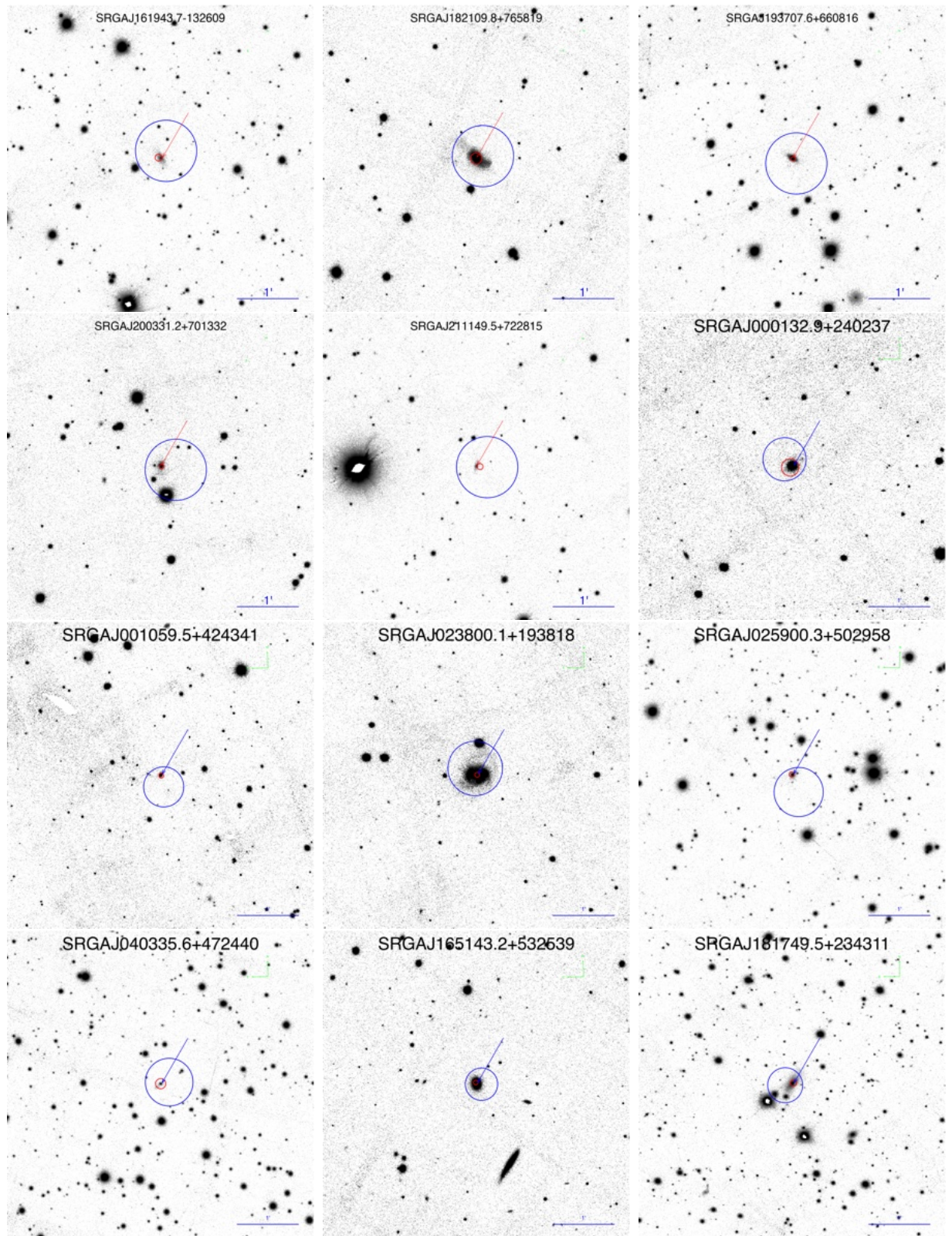


Рисунок 1.1 — Продолжение

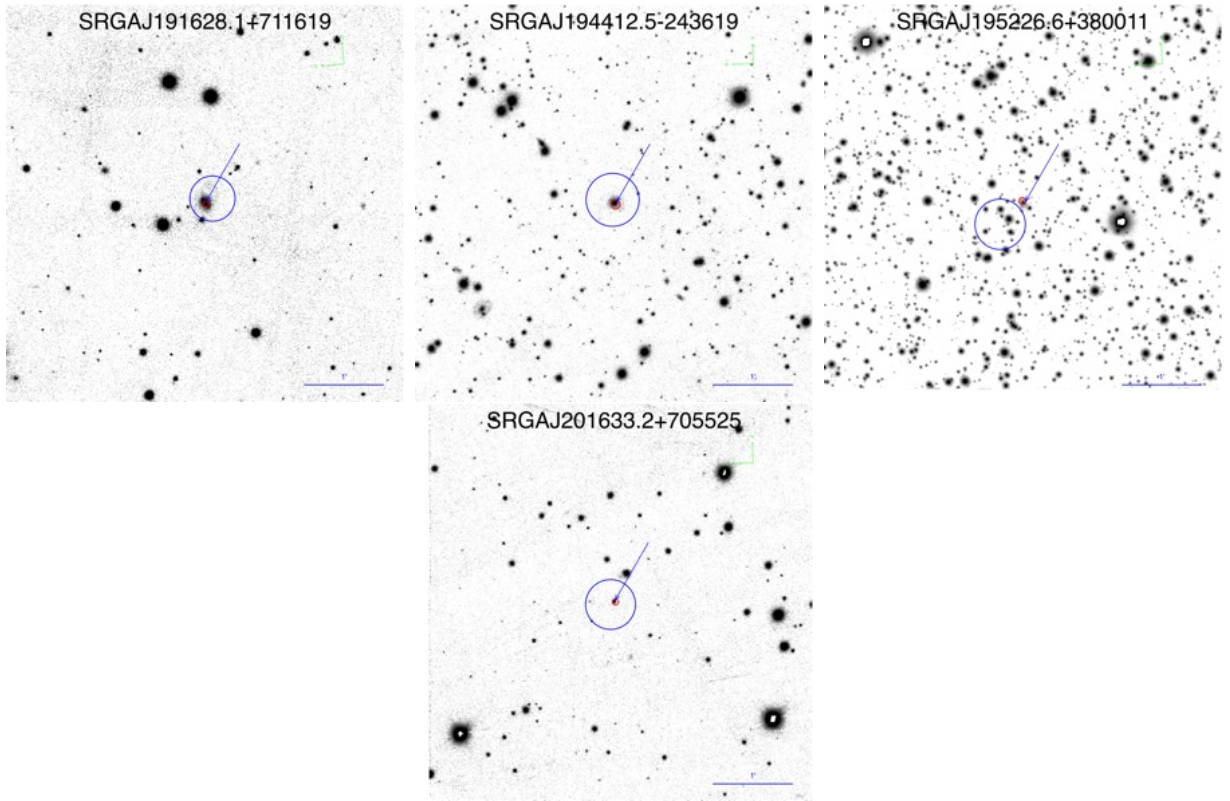


Рисунок 1.1 — Продолжение

1.3.1 Наблюдения на российских телескопах

1.6-м телескоп АЗТ–ЗЗИК [35] Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН расположен близ пос. Монды (Россия, $51^{\circ}37'18.1''$ N, $100^{\circ}55'07.65''$ E) на высоте $\simeq 2000$ м. Оптическая схема – Ричи–Кретьена; фокусное расстояние 30 м, поле зрения $\sim 12'$. АЗТ–ЗЗИК оборудован спектрографом низкого и среднего разрешения АДАМ [36;37]. Спектрограф был разработан в 2014–2015 гг. в САО РАН для задач наземной поддержки рентгеновского обзора неба *СРГ*. Основные параметры комплекса «телескоп+спектрограф+детектор» на АЗТ–ЗЗИК: эквивалентная светосила $F/4.1$, поле $3.46' \times 3.46'$, масштаб $0.81'' \text{ pix}^{-1}$, рабочий диапазон $3600\text{--}10000 \text{ \AA}$, максимальная квантовая эффективность $\simeq 56\%$, типичное спектральное разрешение $\text{FWHM} \approx 6 - 15 \text{ \AA}$ для щели $1.5''$. Доступные щели: $1''$, $1.5''$, $2''$, $3''$ и $10''$. В качестве диспергирующих элементов применяются VPH-гризмы: VPHG300 ($3507\text{--}10307 \text{ \AA}$), VPHG600G ($3588\text{--}7251 \text{ \AA}$) и VPHG600R ($6430\text{--}10031 \text{ \AA}$). Детектор – ПЗС Andor Newton 920 (e2v CCD30-11, 1024×256 , $26 \text{ \mu m}$, глубокое обеднение) с пиковой квантовой эффективностью $\sim 95\%$.

Российско–турецкий 1.5-м телескоп (РТТ-150) расположен в обсерватории TÜBİTAK (Турция, $36^{\circ}49'30''$ N, $30^{\circ}20'08''$ E), на высоте 2500 м. Оптическая схе-

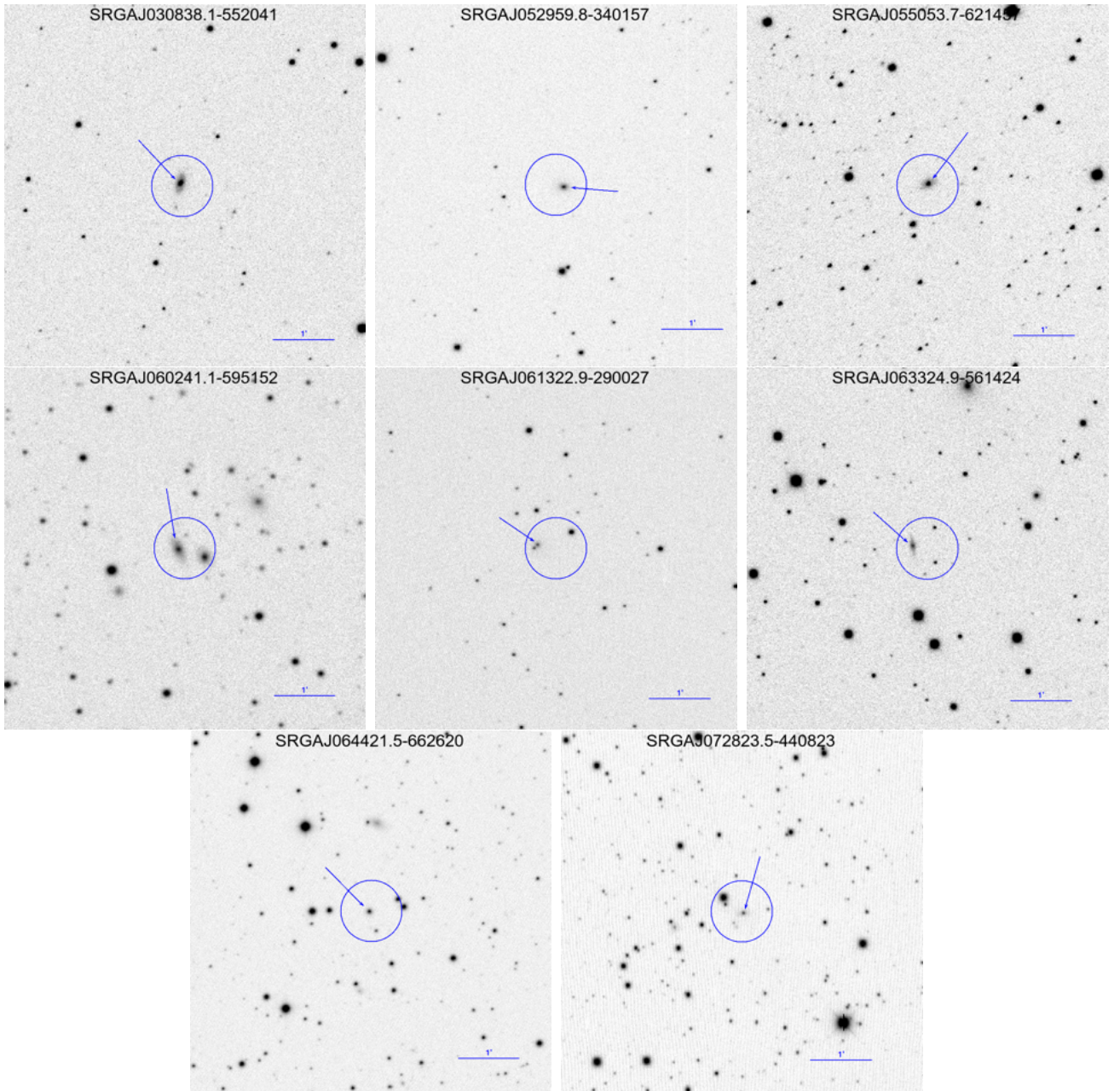


Рисунок 1.2 — Аналогично рис. 1.1, но показаны изображения в фильтре i из обзора *SkyMapper* [32] для объектов из выборки №2, спектры которых были получены в обзоре *6dF* на южном небе. Так как эти объекты находятся на немецкой половине неба *eROSITA*, то показаны только области локализации телескопа *ART-XC*.

ма – Ричи–Кретьена; рабочий спектральный диапазон телескопа 3250–10000 Å. Для спектроскопии использовался спектрограф среднего и низкого разрешения *TFOSC* (TÜBITAK Faint Object Spectrograph and Camera) в фокусе Кассегрена. С мая 2019 года в качестве детектора установлен Andor iKon-L 936 BEX2-DD. Наблюдения проводились длинной щелью шириной 2". Обычно используемый нами набор диспергирующих элементов включает призмы G8 ($\delta\lambda \approx 3$ Å, 5800–8300 Å) и G15 ($\delta\lambda \approx 12$ Å, 3230–9120 Å).

В наших наблюдениях использовались длинные щели шириной 1.5", 2", 3" на спектрографе АДАМ и 2" на спектрографе *TFOSC*. Центр щели совмещался с центральной областью наблюдаемой галактики. После каждой экспозиции положение объекта смещалось вдоль щели на 10–15" вверх или вниз при помощи фотогида. Оптические наблюдения выполнялись при качестве атмосферы лучше 2.5". Наблюдения спектрофотометрических стандартов проводилось в вечерние и утренние сумерки каждую наблюдательную ночь. Использовался список стандартов с сайта Европейской южной обсерватории². После получения серии спектроскопических изображений каждого источника снимались 2–3 изображения калибровочных ламп линейчатого и непрерывного спектра. Обработка проводилась при помощи пакета *PyRAF*³ и собственного ПО. Спектры каждого объекта исправлялись за межзвездное поглощение [38]. Избыток цвета $E(B - V)$ рассчитывался при помощи ПО с сайта *GALExtin*⁴. Использовались карта покраснения из работы [39] и коэффициент $R_V = 3.1$ из работы [40].

1.3.2 Архивные данные обзоров SDSS и 6dF

Если у каких-то источников уже имелись архивные спектры из обзоров SDSS или 6dF, то мы использовали эти данные и не проводили собственных наблюдений. Во-первых, использовались спектры, полученные в ходе обзора Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS [41]), являющегося частью обзора широкоугольного 2.5-м телескопа SDSS [33]. Эти спектры были получены на двухканальном (синий/красный) волоконном спектрографе BOSS [42], обес-

²<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

³<https://iraf-community.github.io/pyraf.html>

⁴<http://www.galextin.org/>

печивающем перекрывающиеся спектральные диапазоны 3600–6350 Å (B) и 5650–10000 Å (R). Спектральное разрешение прибора составляет $\sim 2\text{--}5$ Å. Средняя ширина на полувысоте $FWHM_{\text{res}} \simeq 3.2$ Å (для объединённых данных с двух каналов).

Для объектов южного неба использовались архивные данные обзора 6dF Galaxy Survey (6dFGS [34]), выполненного на 1.2-м телескопе Шмидта UKST (Австралия). В обзоре применён многоволоконный спектрограф с полем зрения 5.7° , оснащённый двумя низкоразрешающими решётками ($R \approx 1000$) с перекрывающимися диапазонами (V и R). Проецируемый диаметр одного волокна $\approx 6.7''$. Спектры 6dF не откалиброваны по потоку и приведены в отсчётах, что не позволяет измерять абсолютные потоки эмиссионных линий, однако они пригодны для оценки эквивалентных ширин и отношений потоков в близких по длине волны линиях, чего достаточно для классификации АЯГ.

Таблица 1.2 — Журнал оптических наблюдений

Источник <i>ART-XC</i>	Дата	Телескоп	Гризма	Щель	Экспозиция, с
Выборка №1					
SRGA J043209.6+354917	2020-09-15	РТТ-150	G15	2''	5×900
SRGA J045049.8+301449	2020-10-22	АЗТ-33ИК	VPHG600G	2''	4×600
SRGA J152101.9+320430	2020-04-24	АЗТ-33ИК	VPHG600G	2''	2×1200
	2020-04-24	АЗТ-33ИК	VPHG600R	2''	3×1200
SRGA J200431.6+610211	2020-10-22	АЗТ-33ИК	VPHG600G	2''	5×300
SRGA J224125.9+760343	2020-06-21	РТТ-150	G15	2''	3×1800
SRGA J232446.8+440756	2020-06-10	РТТ-150	G15	2''	9×600
Выборка №2					
SRGA J025234.3+431004	2021-09-29	АЗТ-33ИК	VPHG600G	2''	3×300
SRGA J062627.2+072734	2021-11-05	РТТ-150	G15	2''	8×600
SRGA J070636.4+635109	2021-05-13	АЗТ-33ИК	VPHG600G	2''	7×200
SRGA J092021.6+860249	2021-10-31	АЗТ-33ИК	VPHG600G	2''	4×300
SRGA J195702.4+615036	2021-05-12	РТТ-150	G15	2''	5×600
SRGA J221913.2+362014	2021-10-31	АЗТ-33ИК	VPHG600G	3''	3×600
	2021-10-31	АЗТ-33ИК	VPHG600R	3''	3×600
SRGA J223714.9+402939	2021-05-13	АЗТ-33ИК	VPHG600G	3''	3×200
SRGA J232037.8+482329	2021-11-05	РТТ-150	G15	2''	4×120
SRGA J235250.6–170449	2021-09-11	АЗТ-33ИК	VPHG600G	2''	4×300
SRGA J030838.1–552041	2002-11-06	6dF	580V	–	4×1200
	2002-11-06	6dF	425R	–	4×600
SRGA J052959.8–340157	2003-11-28	6dF	580V	–	4×1200
	2003-11-28	6dF	425R	–	2×600

Продолжение таблицы 1.2

Источник <i>ART-XC</i>	Дата	Телескоп	Гризма	Щель	Экспозиция, с
SRGA J055053.7–621457	2006-01-02	6dF	580V	–	4×1200
	2006-01-02	6dF	425R	–	4×600
SRGA J060241.1–595152	2005-04-14	6dF	580V	–	4×1200
	2005-04-14	6dF	425R	–	4×600
SRGA J061322.9–290027	2001-11-16	6dF	600V	–	4×1200
	2001-11-16	6dF	316R	–	4×600
SRGA J063324.9–561424	2003-01-05	6dF	580V	–	4×1200
	2003-01-05	6dF	425R	–	4×600
SRGA J064421.5–662620	2005-04-10	6dF	580V	–	4×1200
	2005-04-10	6dF	425R	–	4×600
SRGA J072823.5–440823	2002-12-12	6dF	580V	–	3×1200
	2002-12-12	6dF	425R	–	4×600
Выборка №3					
SRGA J001439.6+183503	2022-10-31	A3T-33ИК	VPHG600G	3''	5×300
SRGA J002240.8+804348	2022-10-31	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	3×600
	2022-11-01	A3T-33ИК	VPHG600R	2''	3×600
SRGA J010742.9+574419	2022-03-04	A3T-33ИК	VPHG600G	3''	6×600
SRGA J021227.3+520953	2022-11-18	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	4×600
	2022-11-21	A3T-33ИК	VPHG600R	2''	4×600
SRGA J025208.4+482955	2022-11-01	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	3×600
SRGA J045432.1+524003	2022-11-01	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	3×600
SRGA J051313.5+662747	2022-11-01	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	3×200
SRGA J110945.8+800815	2022-11-03	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	5×300
	2022-11-03	A3T-33ИК	VPHG600R	2''	2×300
SRGA J161251.4–052100	2003-05-30	6dF	VPH580V	–	3×1200
	2003-05-30	6dF	VPH425R	–	3×600
SRGA J161943.7–132609	2004-04-16	6dF	VPH580V	–	5×1200
	2004-04-16	6dF	VPH425R	–	4×600
SRGA J182109.8+765819	2022-11-17	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	5×600
SRGA J193707.6+660816	2022-11-01	A3T-33ИК	VPHG600G	1.5''	6×300
SRGA J200331.2+701332	2022-11-18	A3T-33ИК	VPHG600G	3''	4×600
	2022-11-18	A3T-33ИК	VPHG600R	3''	4×600
SRGA J211149.5+722815	2022-11-21	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	4×600
	2022-11-21	A3T-33ИК	VPHG600R	2''	5×600
Выборка №4					
SRGA J000132.9+240237	2013-09-08	SDSS	Канал В	–	4×3600
	2013-09-08	SDSS	Канал R	–	4×3600
SRGA J001059.5+424341	2023-11-09	A3T-33ИК	VPHG600G	2''	4×600
	2023-11-09	A3T-33ИК	VPHG600R	2''	4×600

Продолжение таблицы 1.2

Источник <i>ART-XC</i>	Дата	Телескоп	Гризма	Щель	Экспозиция, с
SRGA J023800.1+193818	2023-11-08	АЗТ-33ИК	VRHG600G	2''	3×600
SRGA J025900.3+502958	2023-09-19	АЗТ-33ИК	VRHG600G	2''	4×300
	2023-09-19	АЗТ-33ИК	VRHG600R	2''	3×300
SRGA J040335.6+472440	2023-11-13	АЗТ-33ИК	VRHG600G	2''	4×600
SRGA J165143.2+532539	2023-04-13	АЗТ-33ИК	VRHG600G	2''	4×300
SRGA J181749.5+234311	2023-05-19	АЗТ-33ИК	VRHG600G	2''	4×300
SRGA J191628.1+711619	2023-04-13	АЗТ-33ИК	VRHG600G	2''	4×600
SRGA J194412.5–243619	2003-08-04	6dF	VRH580V	–	6×1200
	2003-08-04	6dF	VRH425R	–	5×600
SRGA J195226.6+380011	2023-11-09	АЗТ-33ИК	VRHG600R	2''	4×600
SRGA J201633.2+705525	2023-11-09	АЗТ-33ИК	VRHG600G	2''	5×600

1.4 Рентгеновские наблюдения

Рентгеновские данные для исследуемых объектов были получены в ходе сканирования небесной сферы телескопами *ART-XC* (жёсткий диапазон) и *eROSITA* (мягкий диапазон) на борту обсерватории *СПГ*. Число проходов, на основе которых строились спектры, зависело от стадии программы: для объектов выборки №1 [25] использовались данные первого прохода; выборки №2 [28] – данные первых двух проходов (ARTSS1-2); выборки №3 [29] и №4 [30] – данные четырёх полных и примерно 40% пятого прохода (ARTSS1-5). Так как телескоп *eROSITA* был переведён в спящий режим 26 февраля 2022 г., то для одного из источников (SRGA J040335.6+472440) отсутствуют данные *eROSITA* для пятого обзора, но имеются соответствующие данные телескопа *ART-XC*, который продолжал сканировать небо до 7 марта 2022 г. Рентгеновские спектры анализировались одновременно по данным *eROSITA* и *ART-XC* в диапазоне энергий 0.2–20 кэВ.

1.4.1 Извлечение спектров *ART-XC*

Во всех четырёх выборках рентгеновские данные обрабатывались по схожей схеме. Данные всех семи модулей телескопа объединялись. Отсчеты извлекались из апертуры радиусом $120''$ (для выборок №№1-3) или $71''$ (для выборки №4). Использовалась диагональная матрица отклика, построенная по данным наблюдений Крабовидной туманности в ходе обзора неба. Уровень фона оценивался по данным с детектора *ART-XC* в диапазоне энергий 30–70 кэВ и карт вейвлет-разложения изображений обзора неба [43].

Небольшие отличия в обработке данных для разных выборок касались главным образом диапазонов энергий, в которых извлекались отсчеты для построения спектров. А именно, для выборки №1 [25] использовался широкий диапазон 4–12 кэВ, для выборки №2 – три полосы: 4–8, 8–12 и 12–20 кэВ, для выборки №3 – два диапазона: 4–7 и 7–12 кэВ, для выборки №4 – три полосы: 4–7, 7–12 и 12–20 кэВ. Отметим, что так как речь идет о слабых источниках, которые были задетектированы в ходе нескольких коротких проходов при сканировании небесной сферы, то от каждого из них, как правило, зарегистрировано в сумме менее 20 отсчетов (за вычетом фона), чего недостаточно для построения детальных спектров лишь по данным телескопа *ART-XC*.

1.4.2 Извлечение спектров *eROSITA*

Данные *eROSITA* во всех четырёх выборках были обработаны с помощью созданной и поддерживаемой в ИКИ РАН системы калибровки и обработки данных, построенной с использованием элементов пакета eSASS (*eROSITA* Science Analysis Software System) и математического обеспечения, разработанного в научной группе по рентгеновскому каталогу Российского консорциума телескопа *eROSITA*. Спектры источников извлекались по данным всех семи модулей *eROSITA* в диапазоне 0.2–9.0 кэВ (если не оговорено иное) из апертуры радиусом $R = 60''$, а фон – из кольца с внутренним и внешним радиусами $R_{\text{in}} = 120''$ и $R_{\text{out}} = 300''$ вокруг источника, при этом посторонние источники в области фона маскировались кругами радиусом $R = 40''$.

Для выборки №1 данные группировались в восьми энергетических интервалах: 0.3–0.5, 0.5–0.7, 0.7–1, 1–1.5, 1.5–2, 2–4, 4–6 и 6–9 кэВ. Для выборок №№2–4 спектры бинировались таким образом, чтобы в каждом энергетическом канале было не менее 3 отсчетов.

1.5 Результаты

1.5.1 Оптические спектры

На рис. 1.3 показаны оптические спектры исследуемых объектов. Во всех спектрах присутствуют эмиссионные линии. Наша задача состояла в измерении их потоков и ширин для последующего определения красных смещений, классификации объектов и изучения их физических свойств.

Спектральный континуум аппроксимировался полиномом, а эмиссионные линии – гауссианами. Таким образом для каждой линии определялись: центральная длина волны, ширина на полувысоте $FWHM_{\text{mes}}$, поток и эквивалентная ширина EW . Ширина линий исправлялась за спектральное разрешение прибора: $FWHM = \sqrt{FWHM_{\text{mes}}^2 - FWHM_{\text{res}}^2}$, где $FWHM_{\text{res}}$ определялось для каждого диспергирующего элемента и для каждой щели как ширина на полувысоте линий в спектре калибровочных ламп. В Приложении А в табл. А.1 представлены измеренные характеристики линий для всех источников.

Для объектов выборки №1 мы измеряли ширины всех линий, в том числе и узких. Для источников из выборок №№2–4 мы измеряли только ширины широких линий. Ширины узких линий мы также пытались определить, однако в большинстве спектров их наблюдаемая ширина оказалась сравнимой с приборным уширением, поэтому значения $FWHM$ для узких линий в таблице не приводятся. Исключение – выборка №2: для спектров из обзора 6dF мы дополнительно вычисляли наблюдаемые ширины узких линий и указывали их лишь в тех случаях, когда они статистически превышали приборное уширение. Доверительные интервалы на эквивалентные ширины (EW) линий определялись с помощью метода Монте-Карло. Предполагая, что ошибки на поток подчиня-

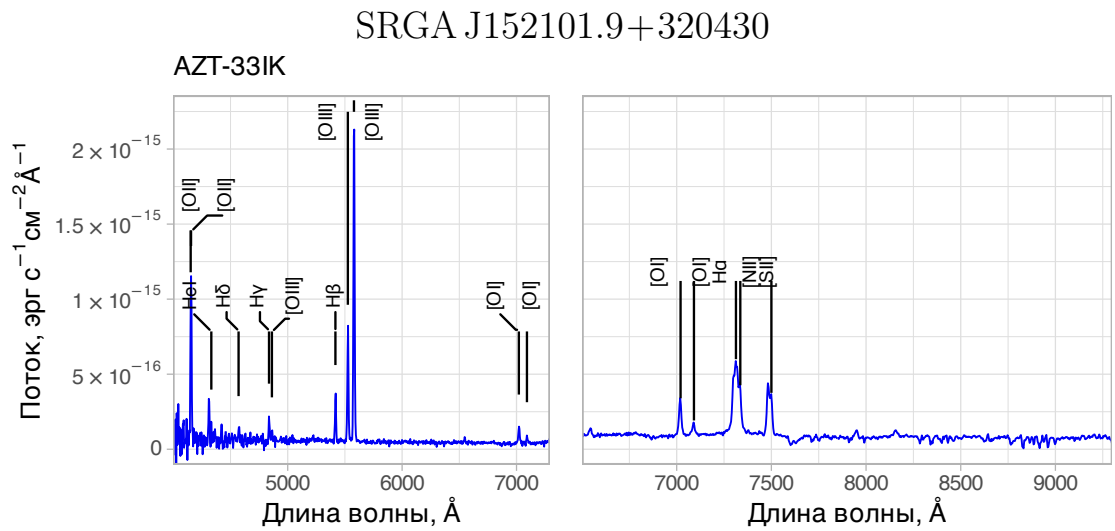
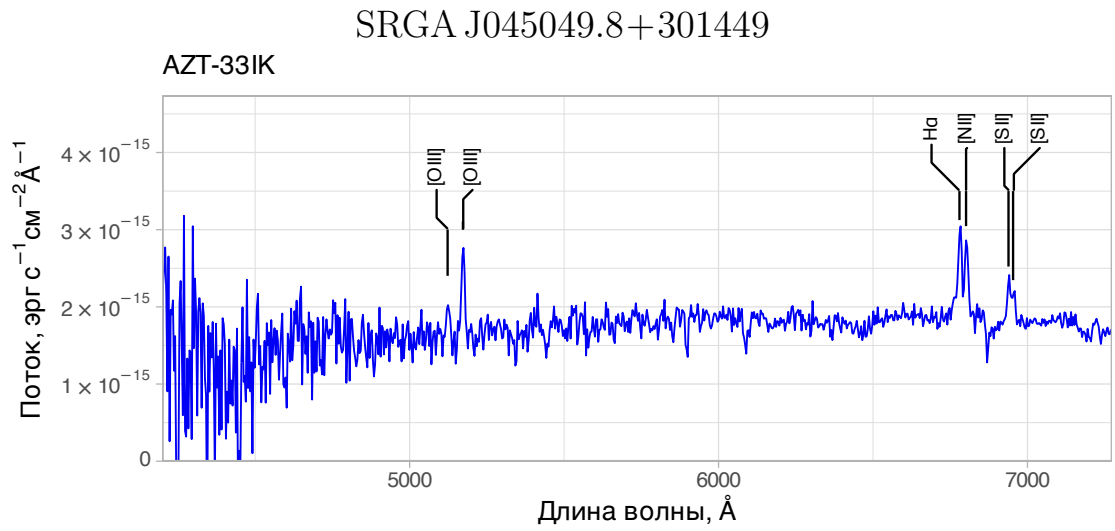
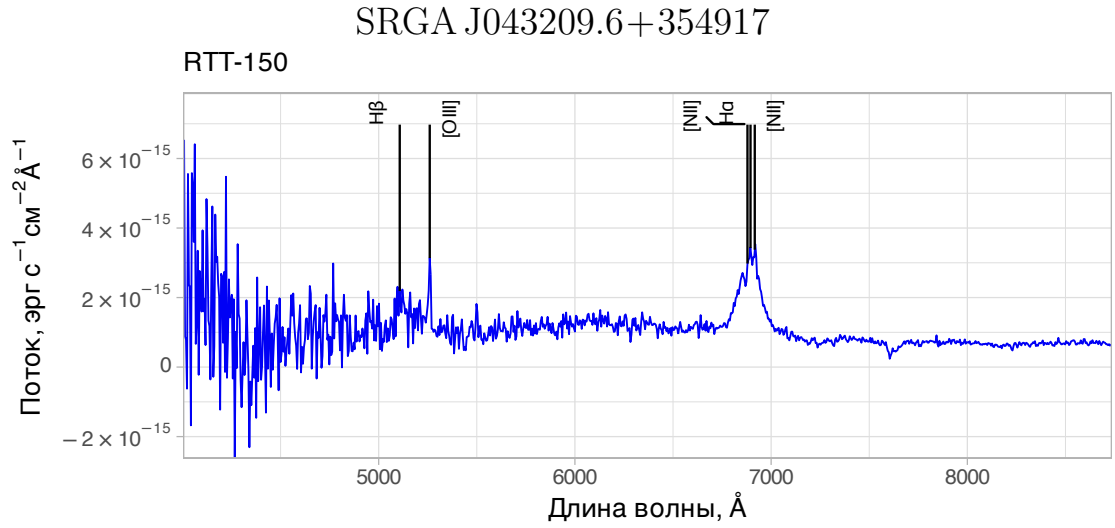
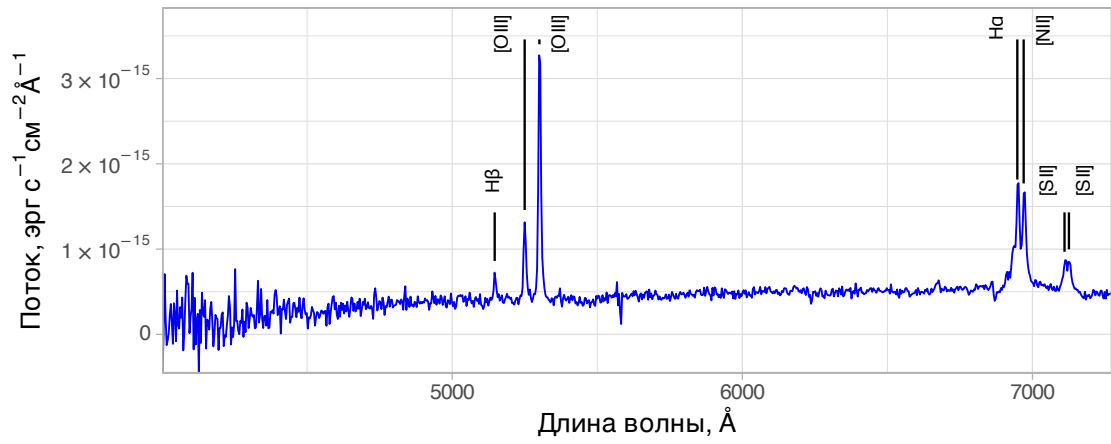


Рисунок 1.3 — Оптические спектры с отмеченными основными линиями излучения и поглощения. Также приведены названия телескопов (или обзоров), на которых были получены спектры.

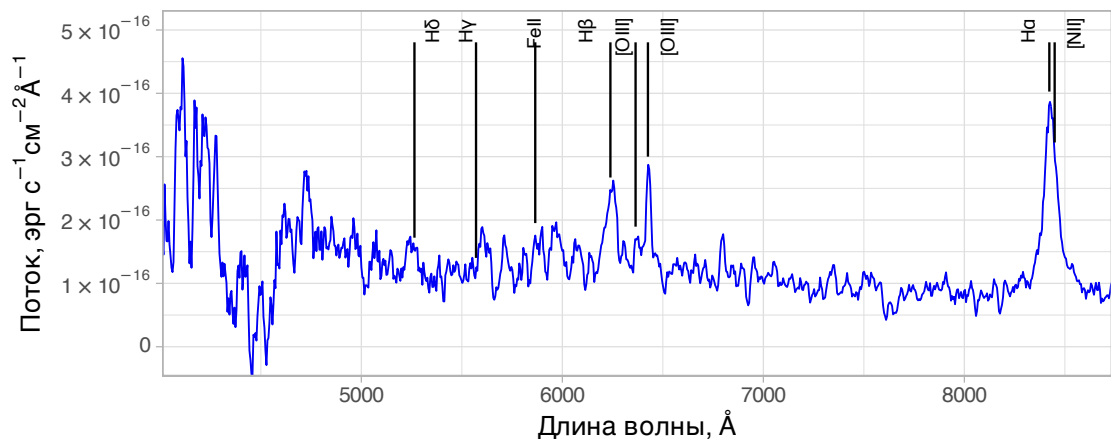
SRGA J200431.6+610211

AZT-33IK



SRGA J224125.9+760343

RTT-150



SRGA J232446.8+440756

RTT-150

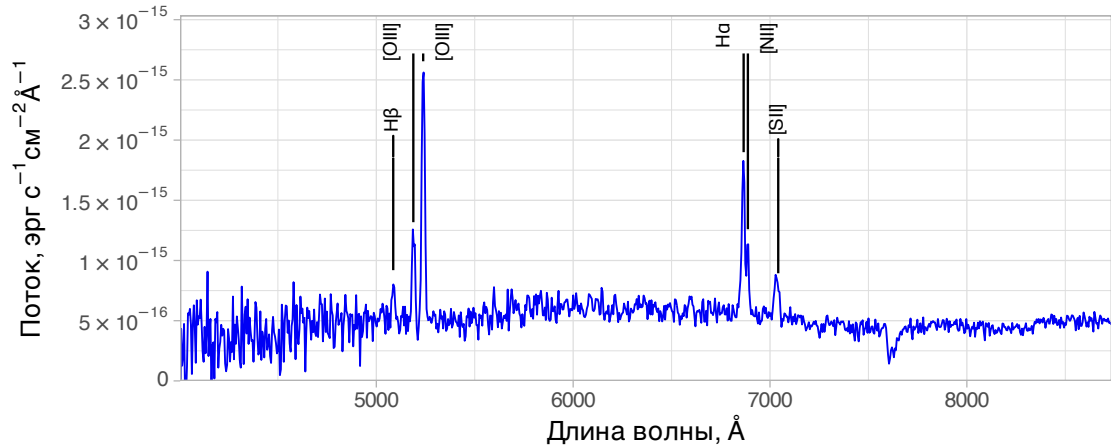
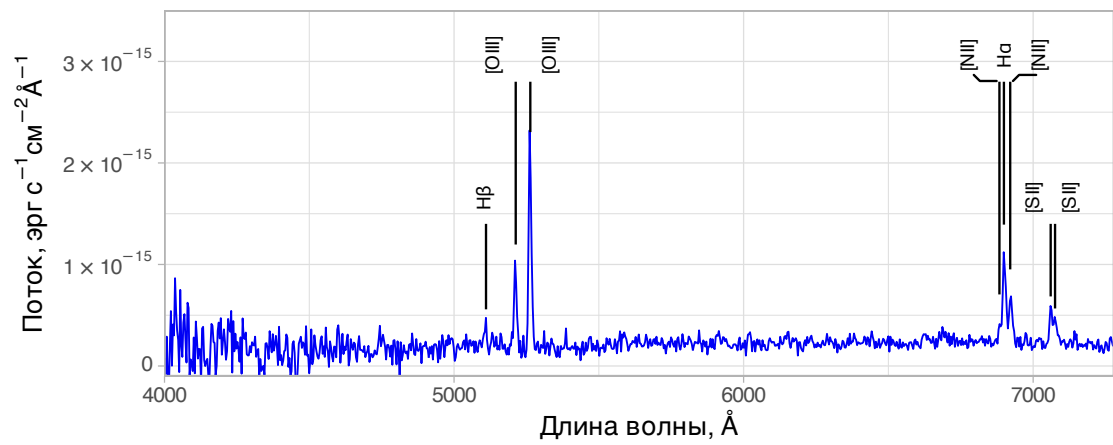


Рисунок 1.3 — Продолжение.

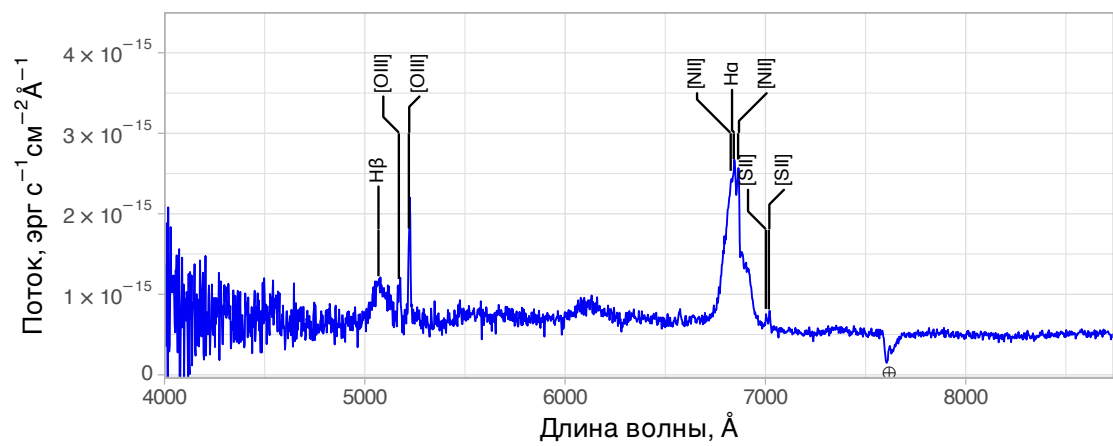
SRGA J025234.3+431004

AZT-33IK



SRGA J062627.2+072734

RTT-150



SRGA J070636.4+635109

AZT-33IK

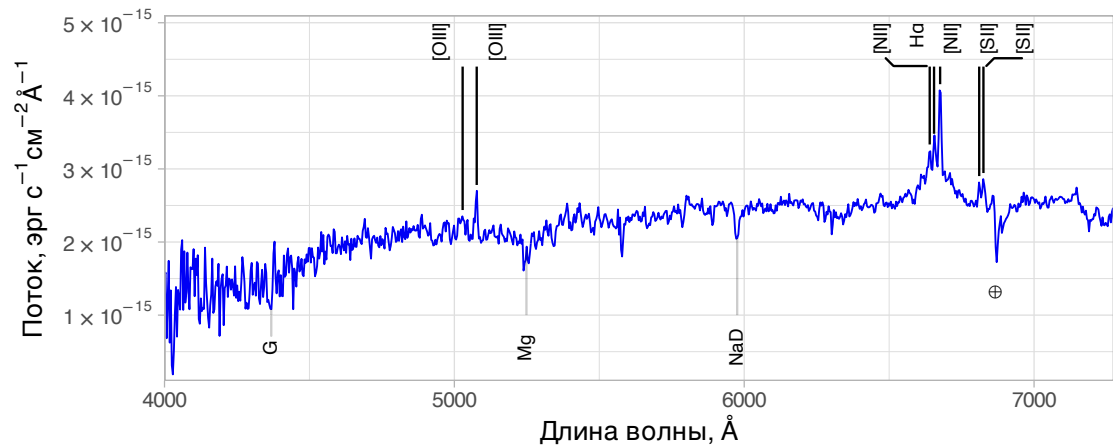
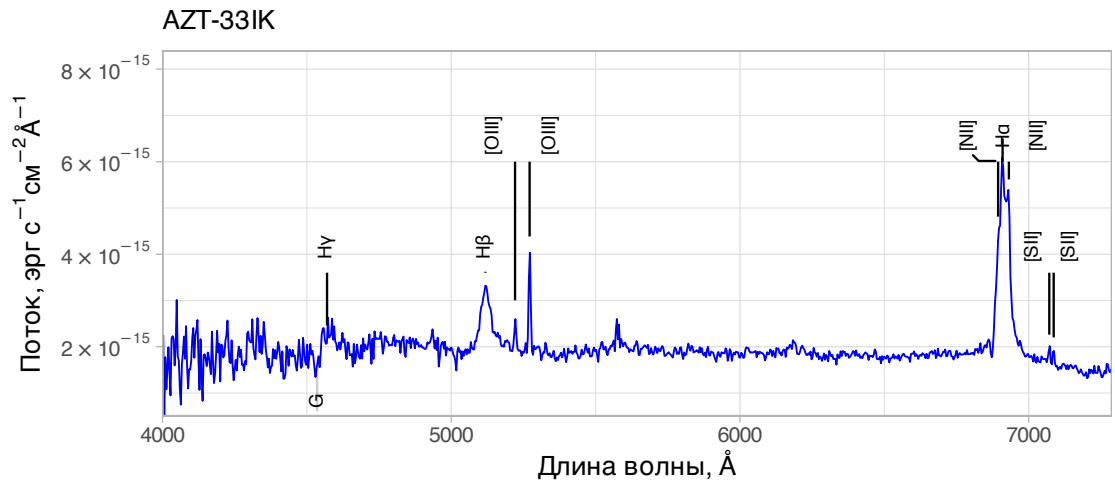
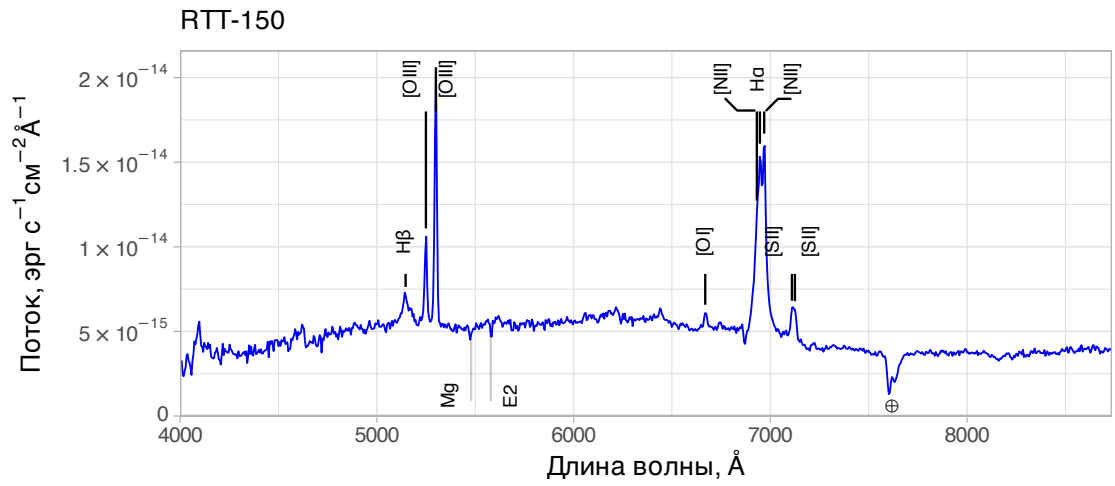


Рисунок 1.3 — Продолжение.

SRGA J092021.6+860249



SRGA J195702.4+615036



SRGA J221913.2+362014

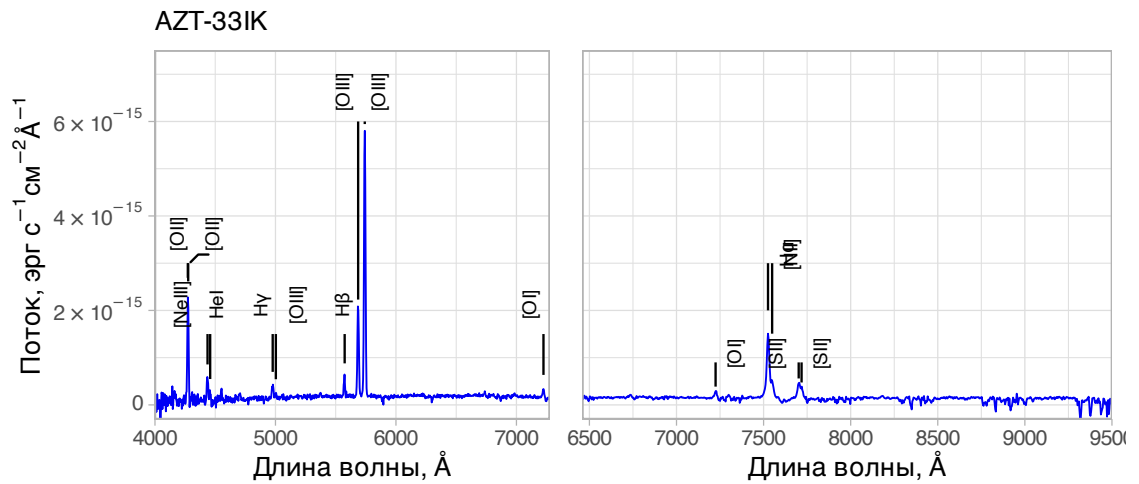
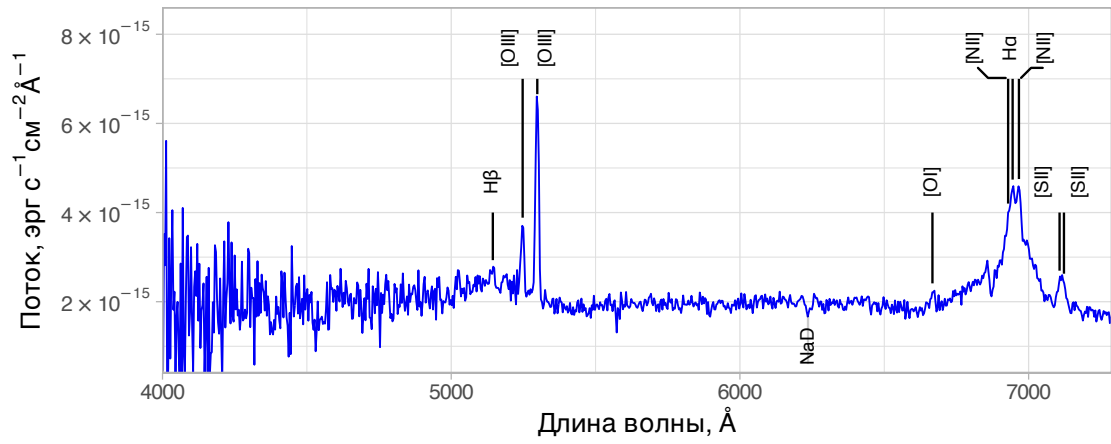


Рисунок 1.3 — Продолжение.

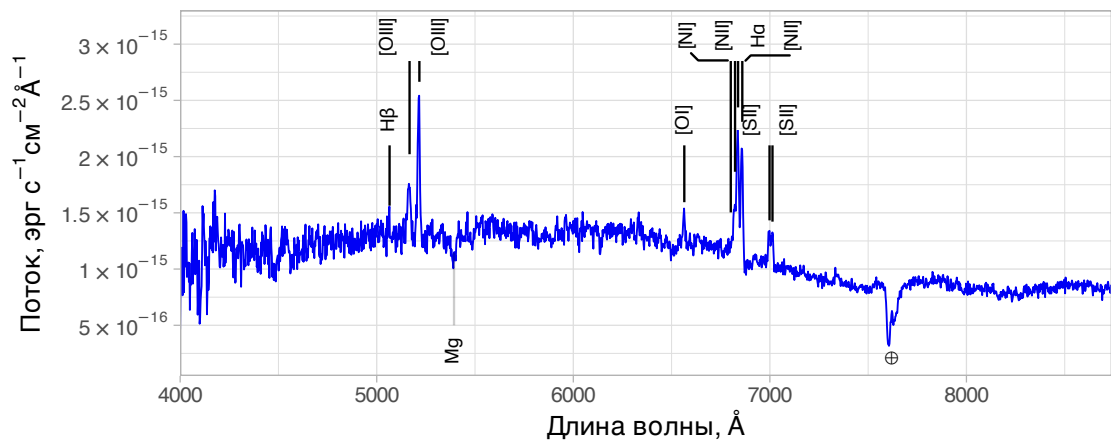
SRGA J223714.9+402939

AZT-33IK



SRGA J232037.8+482329

RTT-150



SRGA J235250.6–170449

AZT-33IK

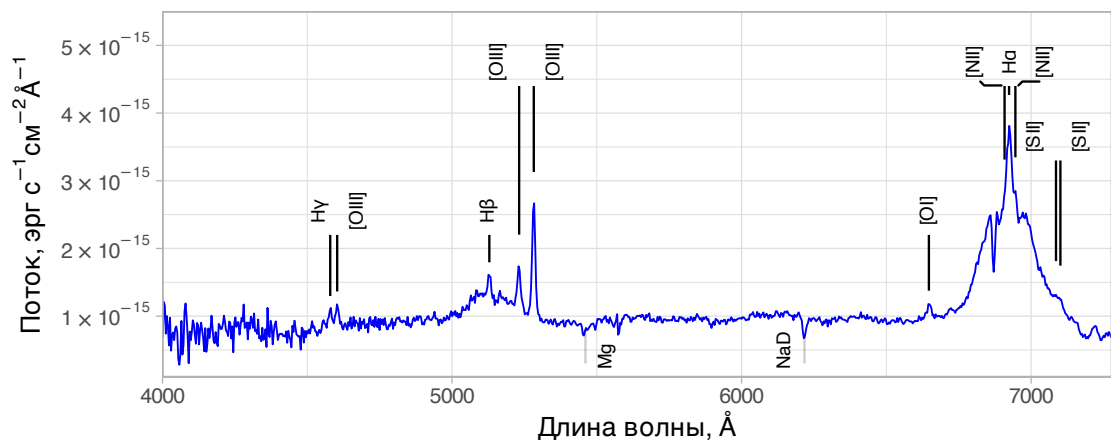
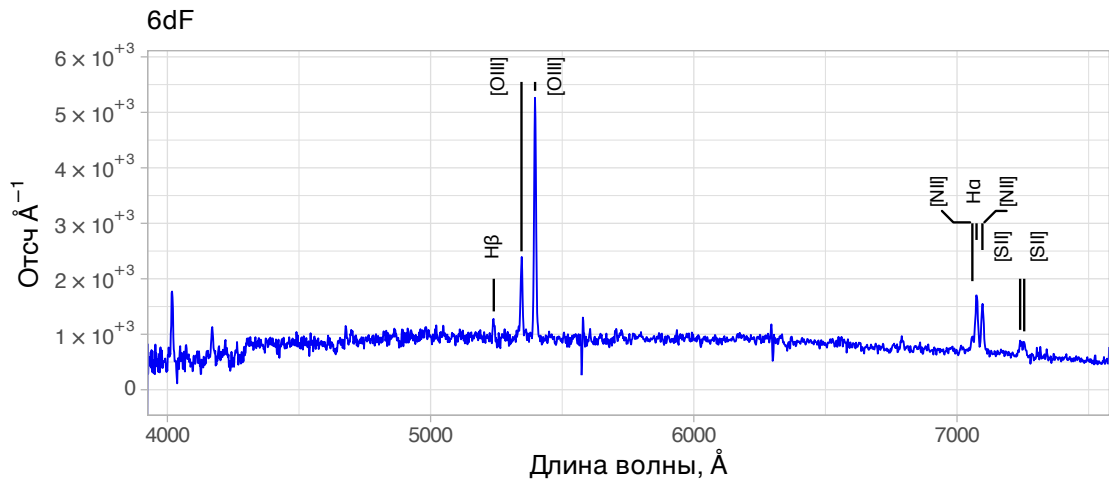
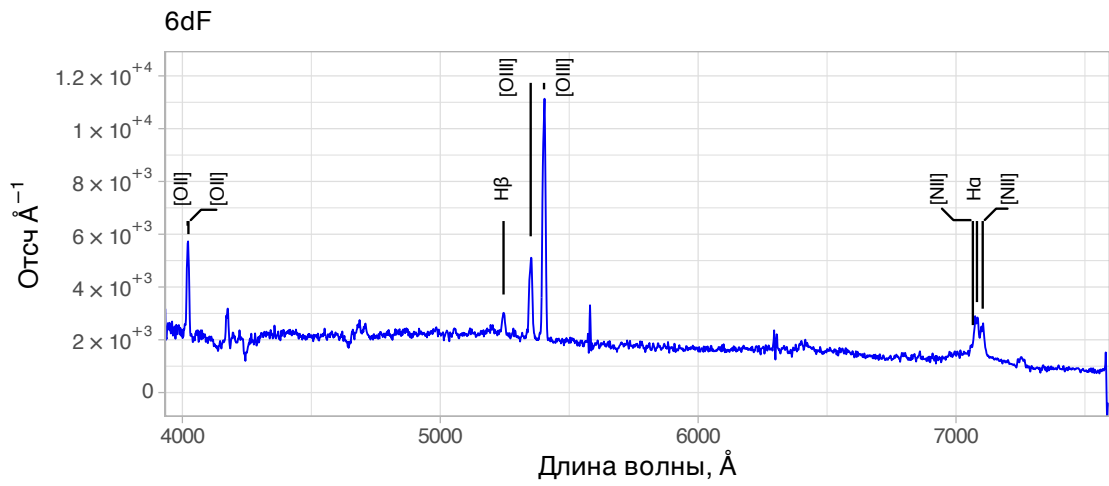


Рисунок 1.3 — Продолжение.

SRGA J030838.1-552041



SRGA J052959.8-340157

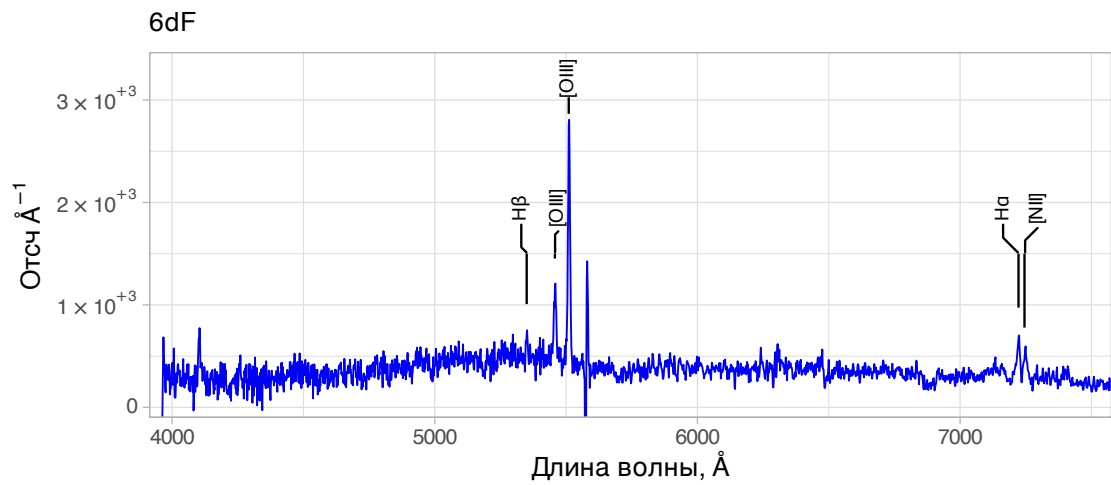


SRGA J055053.7-621457

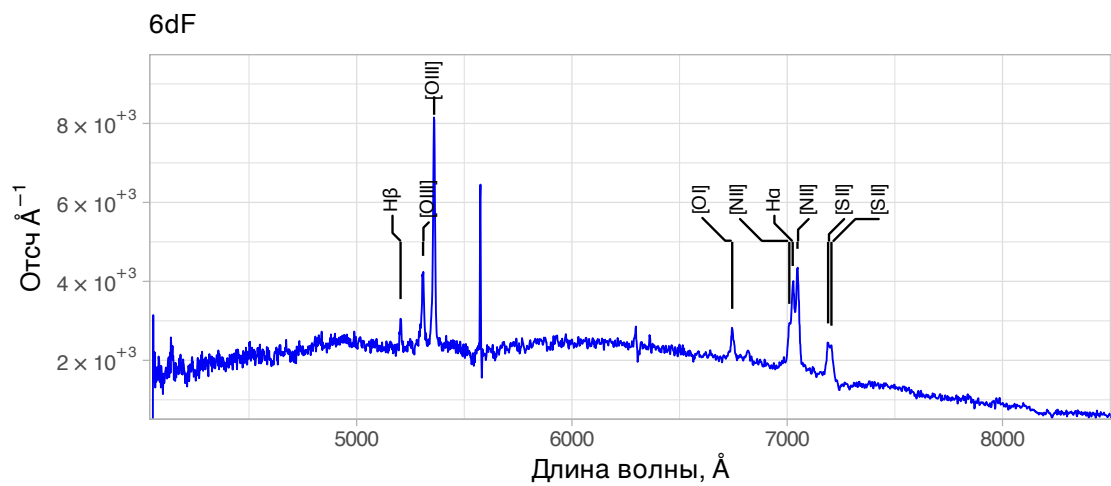


Рисунок 1.3 — Продолжение.

SRGA J060241.1-595152



SRGA J061322.9-290027



SRGA J063324.9-561424

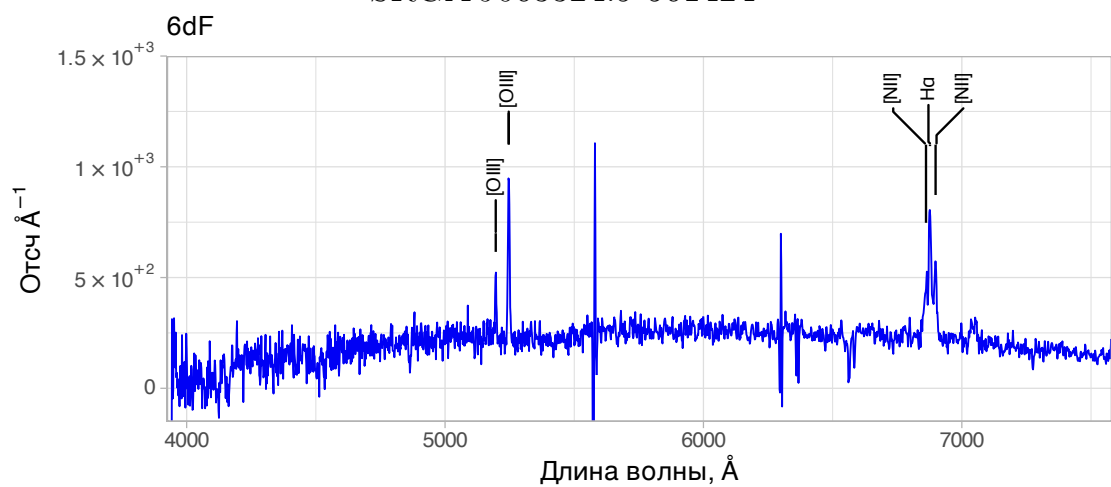
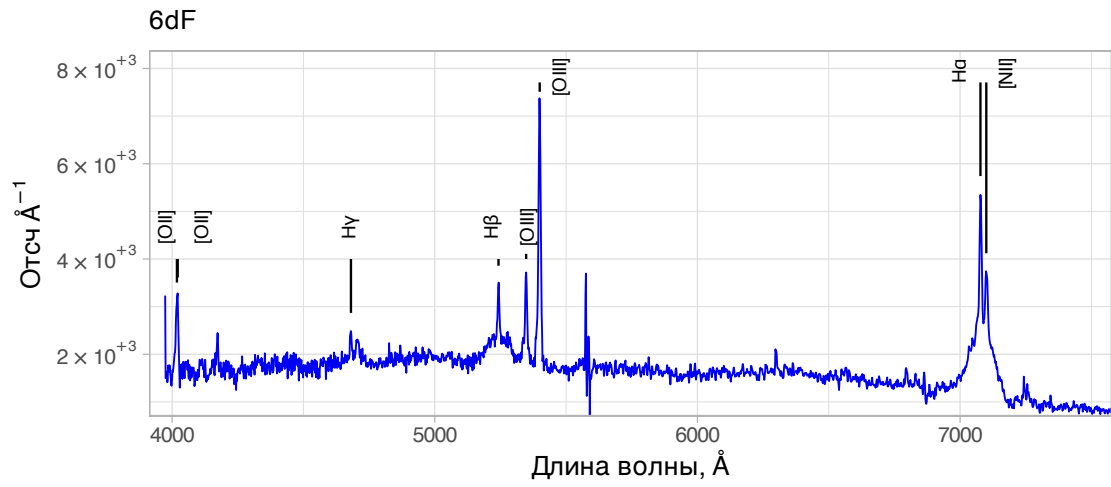
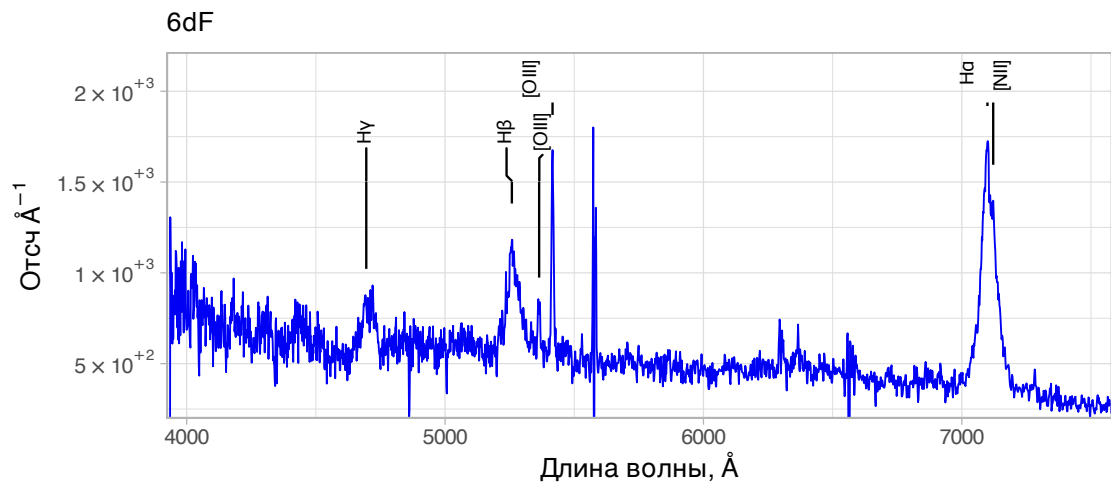


Рисунок 1.3 — Продолжение.

SRGA J064421.5-662620



SRGA J072823.5-440823



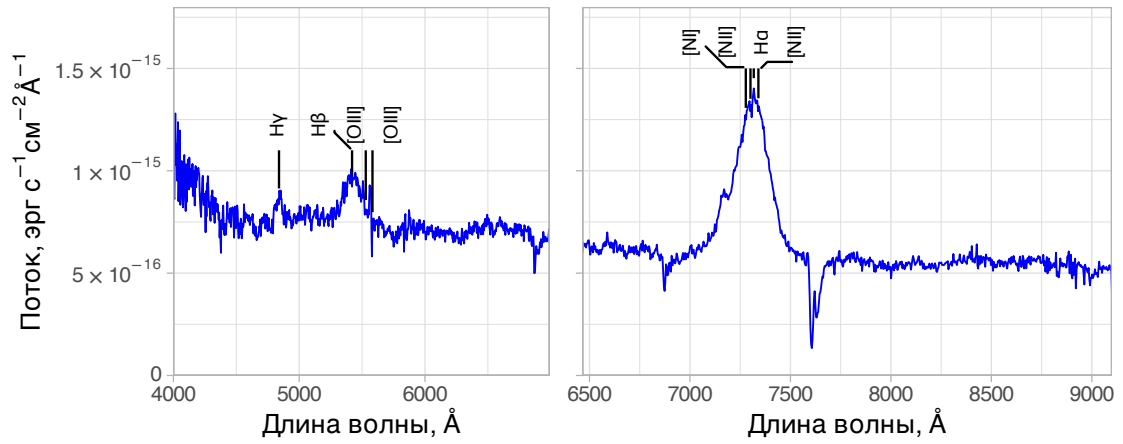
SRGA J001439.6+183503



Рисунок 1.3 — Продолжение.

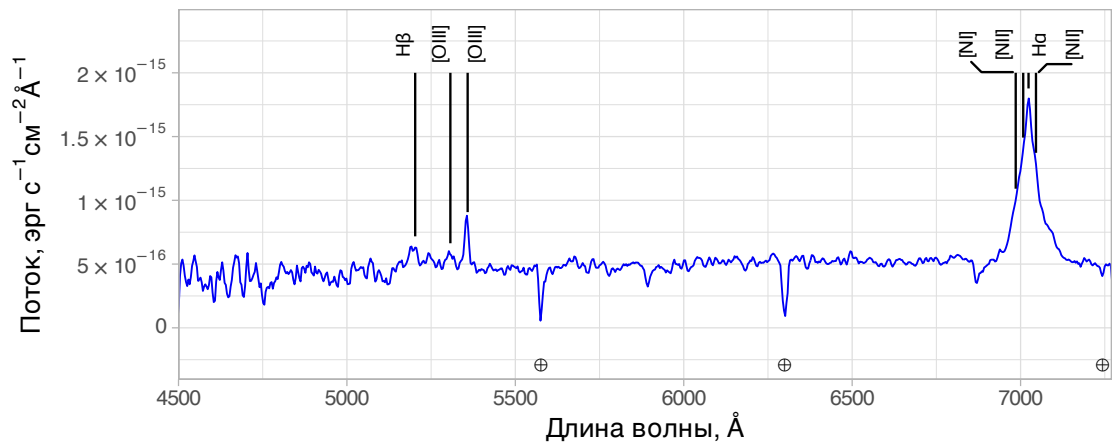
SRGA J002240.8+804348

AZT-33IK



SRGA J010742.9+574419

AZT-33IK



SRGA J021227.3+520953

AZT-33IK

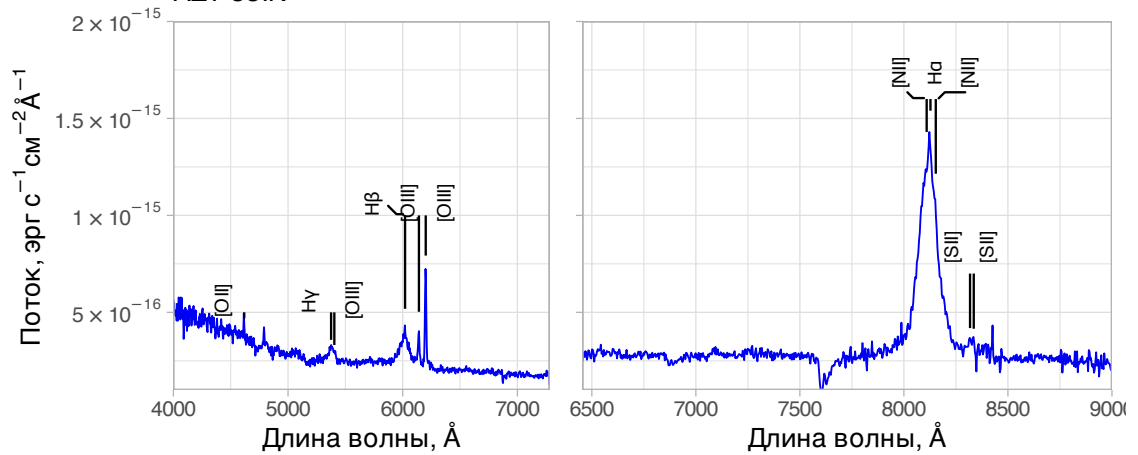
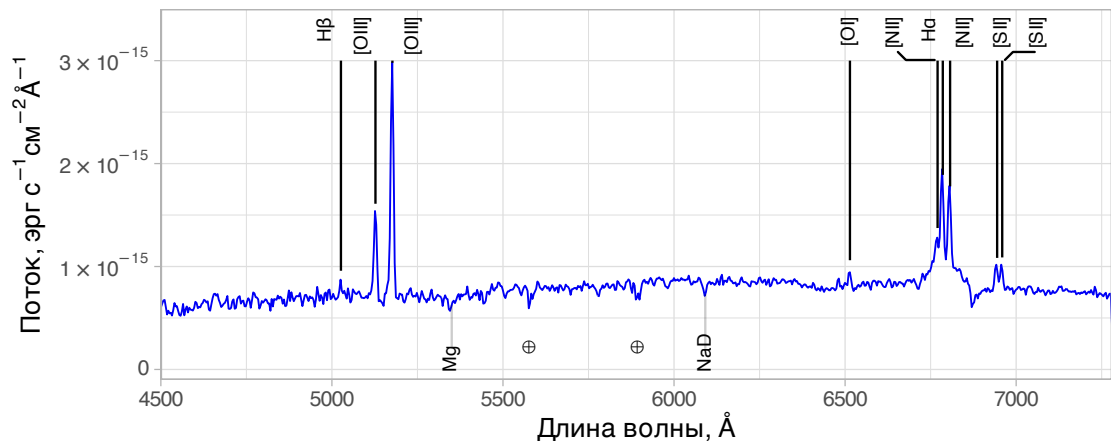


Рисунок 1.3 — Продолжение.

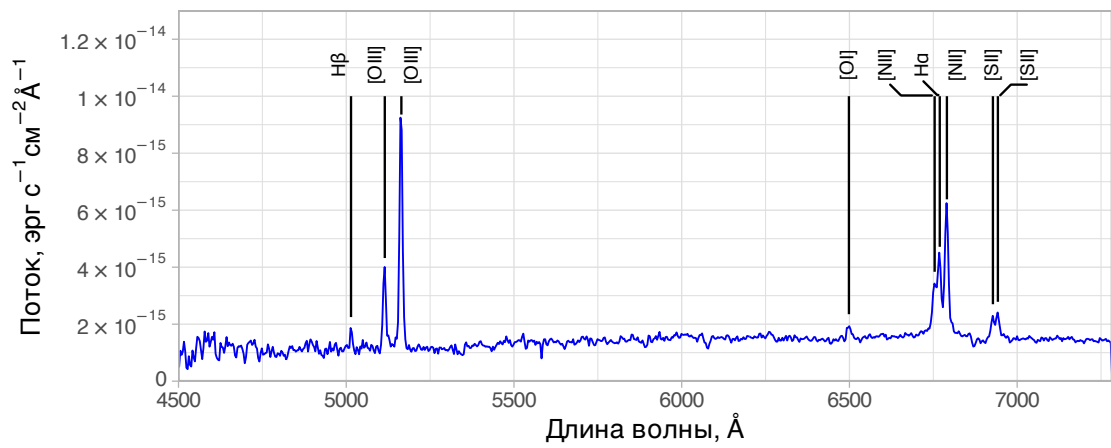
SRGA J025208.4+482955

AZT-33IK



SRGA J045432.1+524003

AZT-33IK



SRGA J051313.5+662747

AZT-33IK

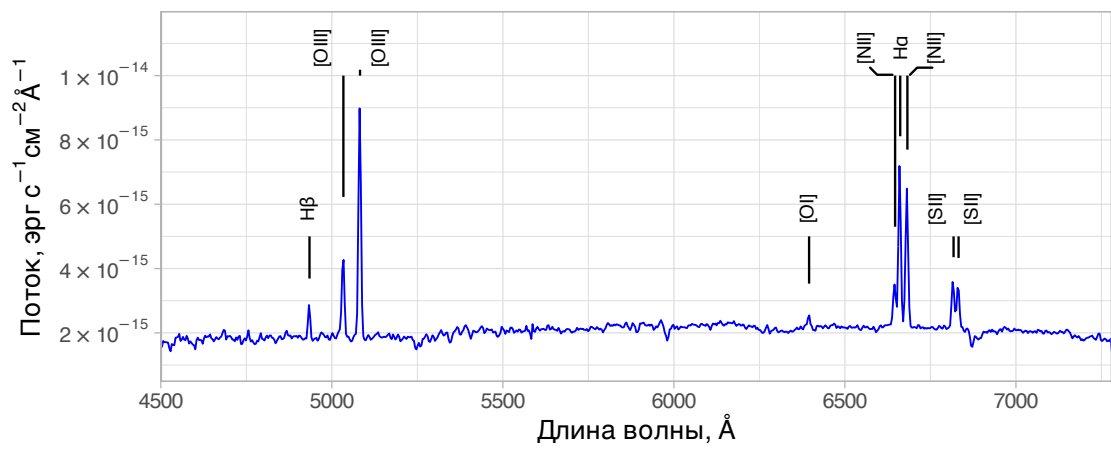
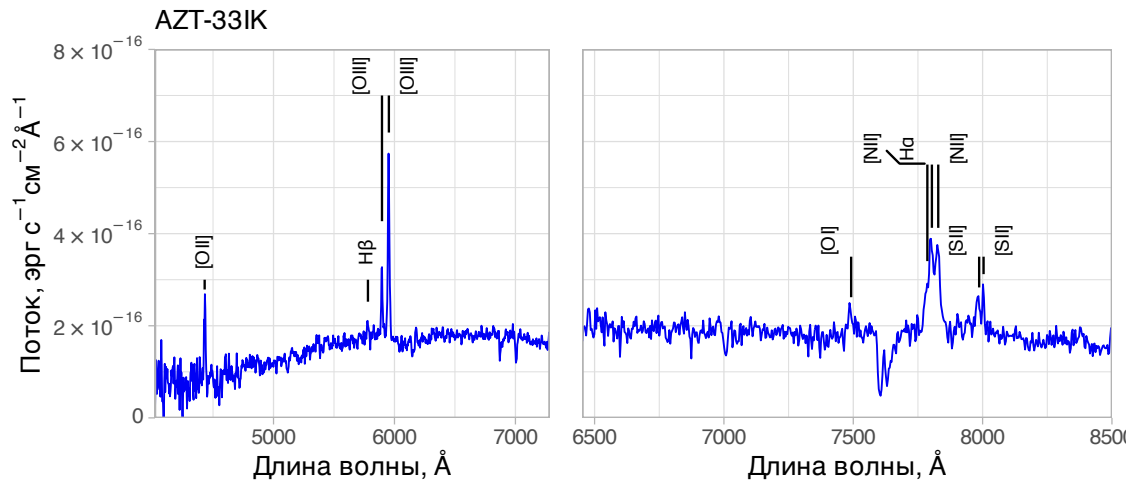
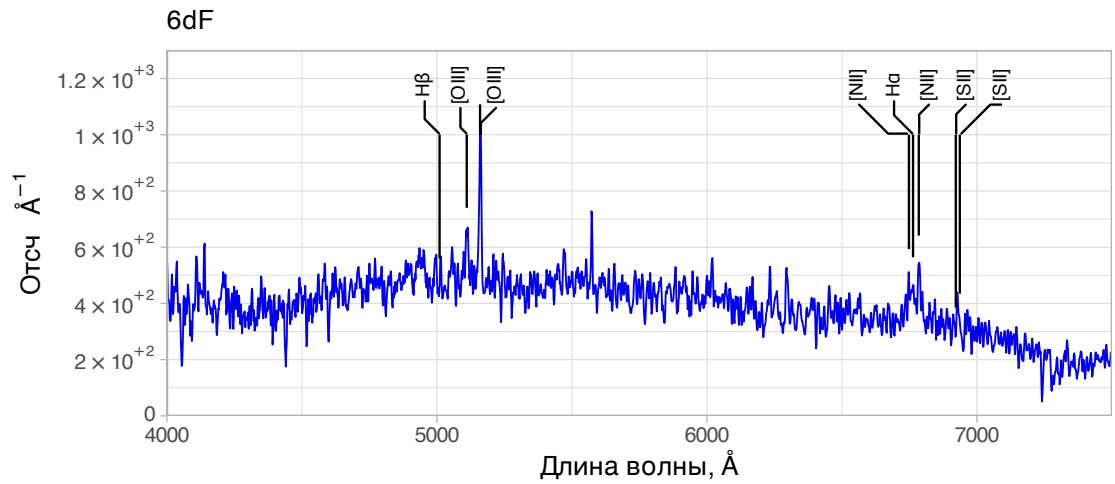


Рисунок 1.3 — Продолжение.

SRGA J110945.8+800815



SRGA J161251.4-052100



SRGA J161943.7-132609

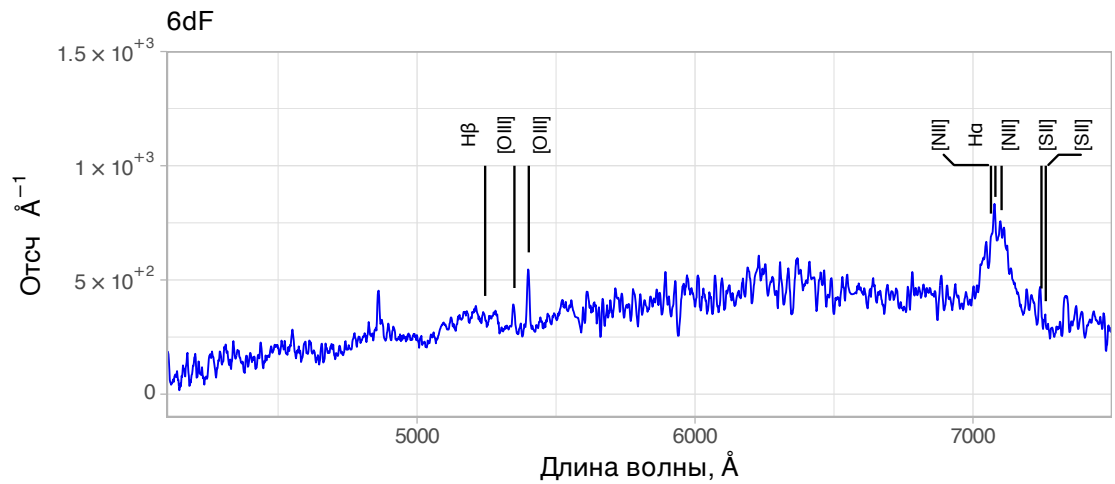
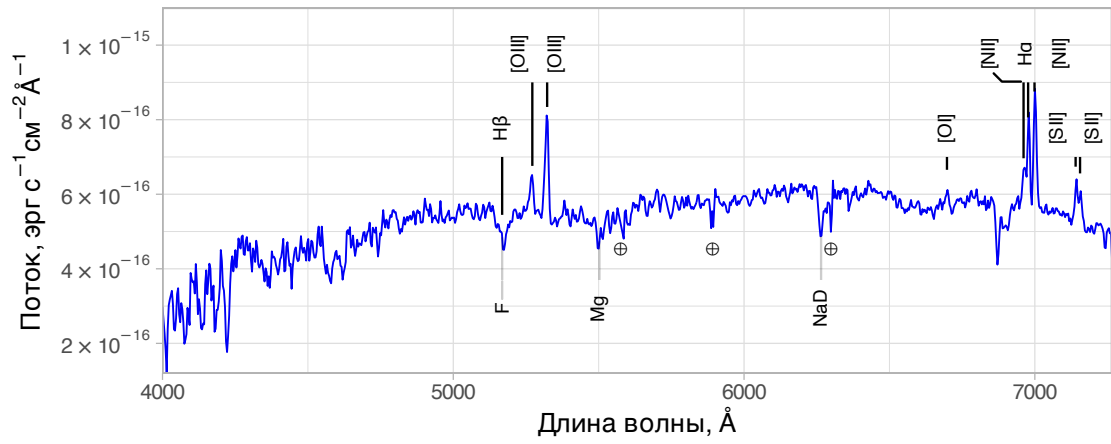


Рисунок 1.3 — Продолжение.

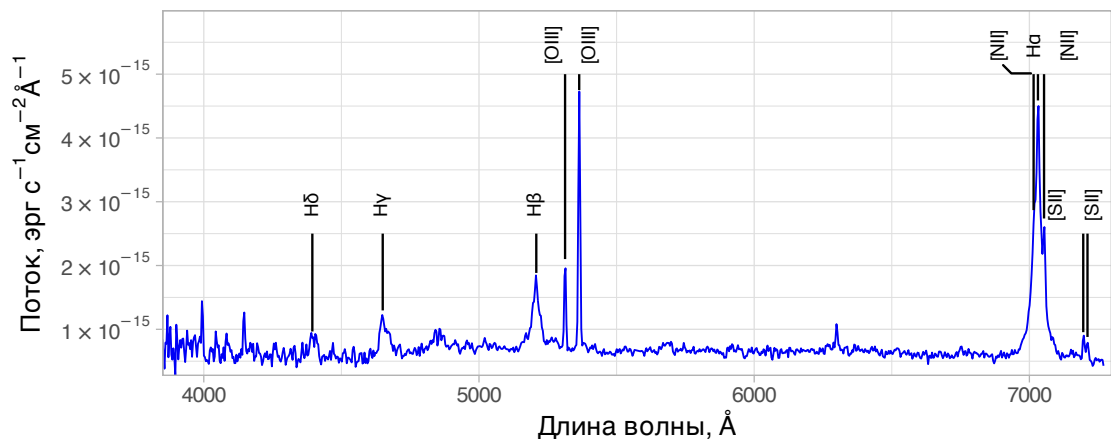
SRGA J182109.8+765819

AZT-33IK



SRGA J193707.6+660816

AZT-33IK



SRGA J200331.2+701332

AZT-33IK

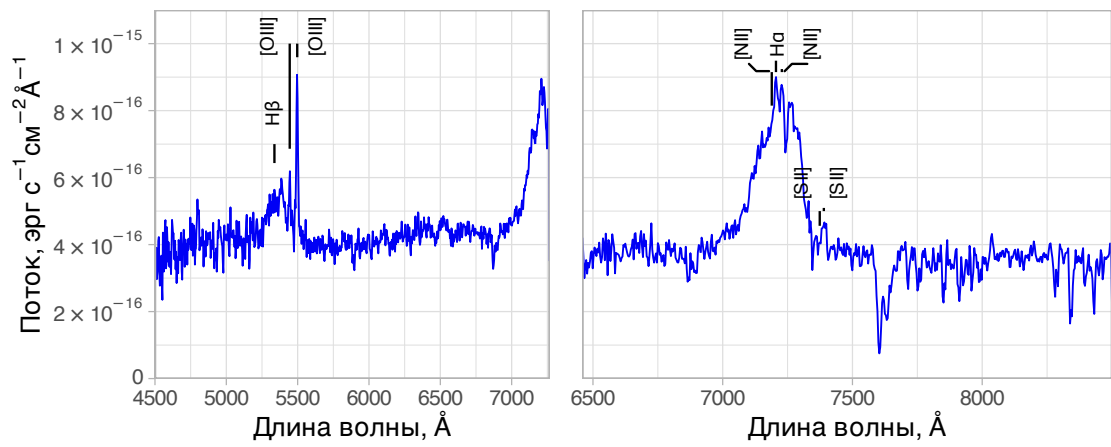
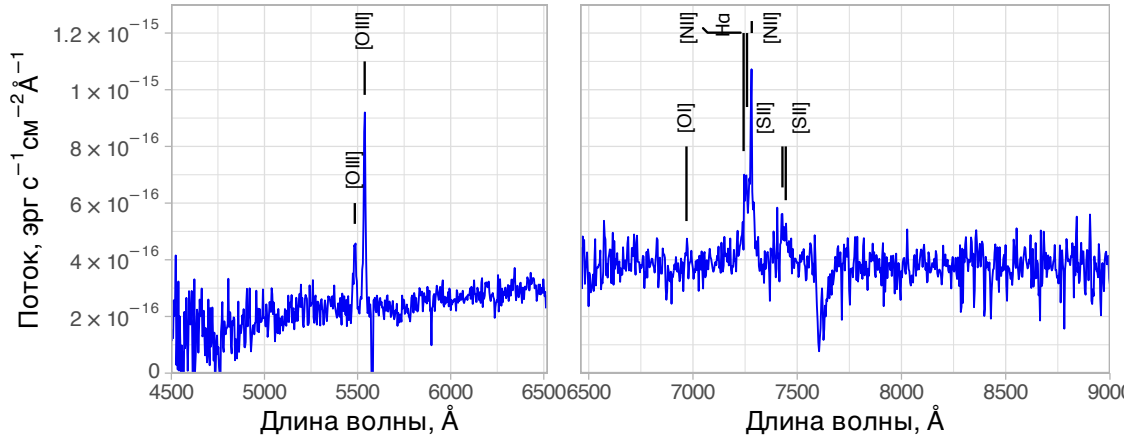


Рисунок 1.3 — Продолжение.

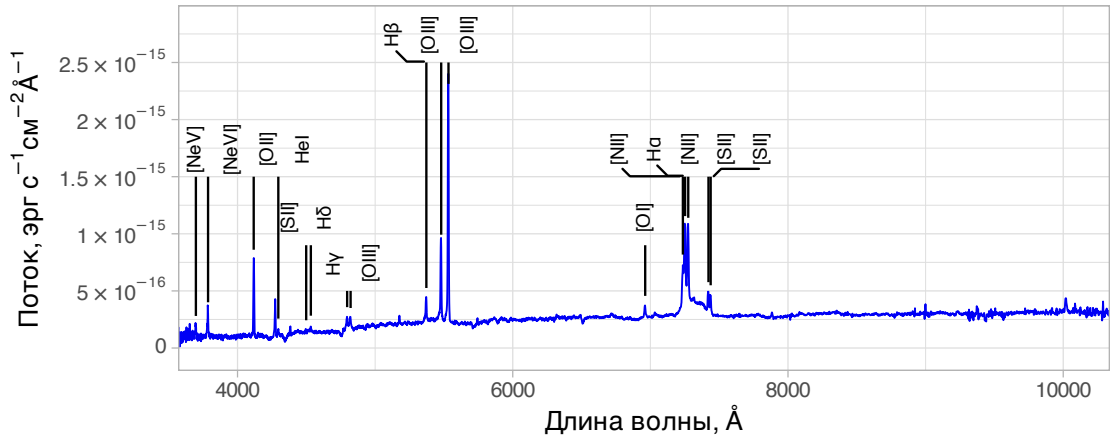
SRGA J211149.5+722815

AZT-33IK



SRGA J000132.9+240237

SDSS



SRGA J001059.5+424341

AZT-33IK

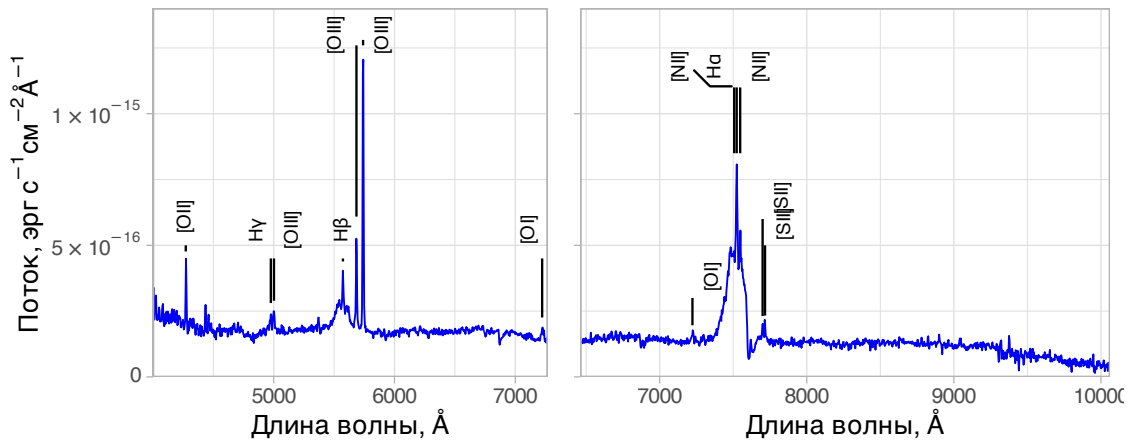
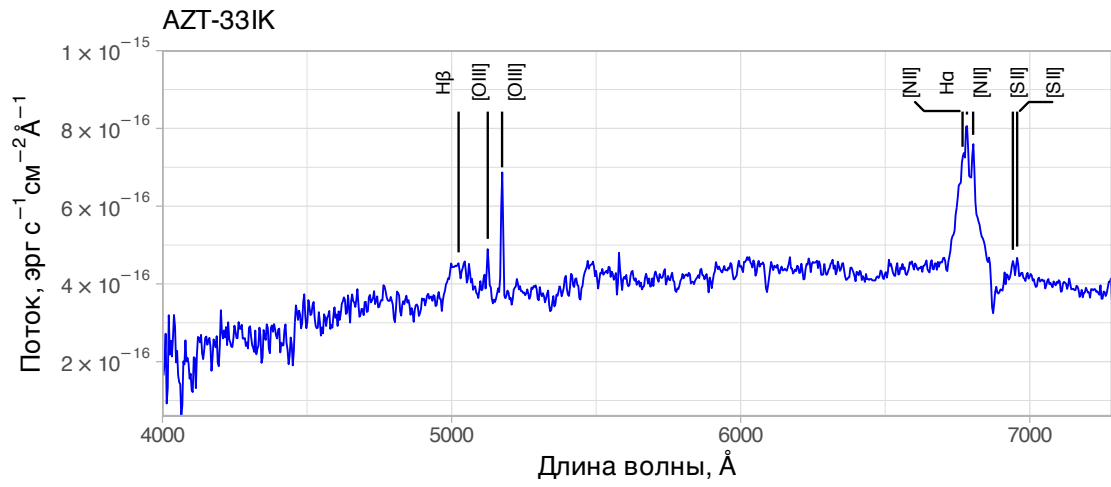
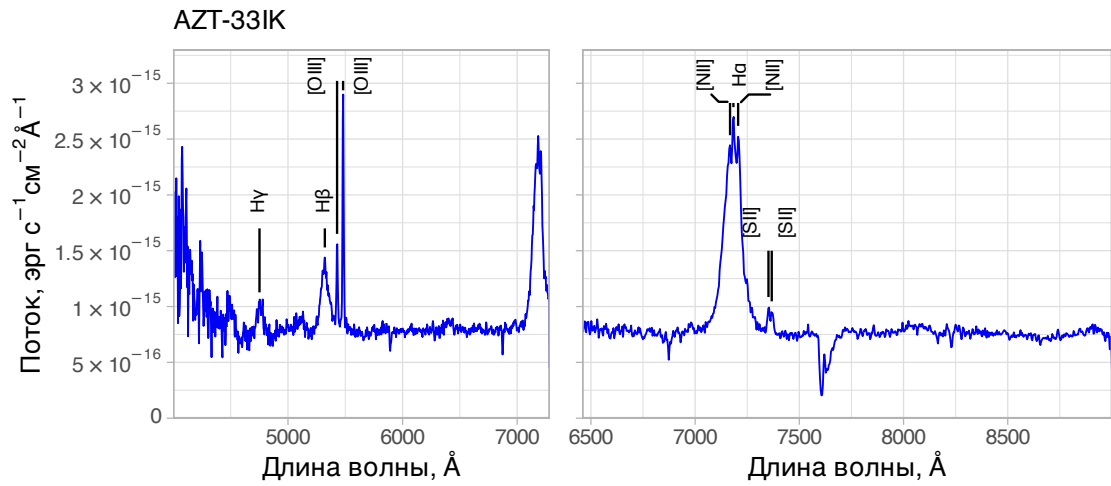


Рисунок 1.3 — Продолжение.

SRGA J023800.1+193818



SRGA J025900.3+502958



SRGA J040335.6+472440

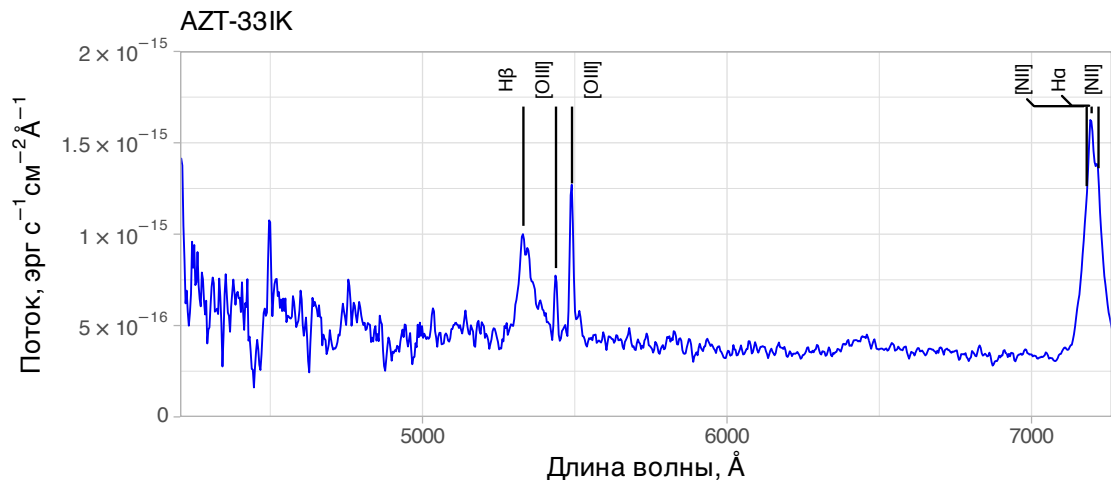
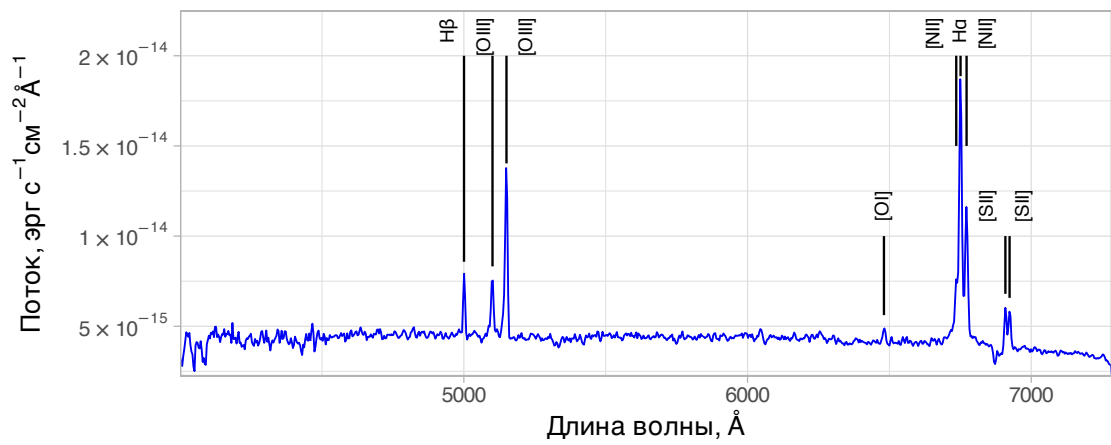


Рисунок 1.3 — Продолжение.

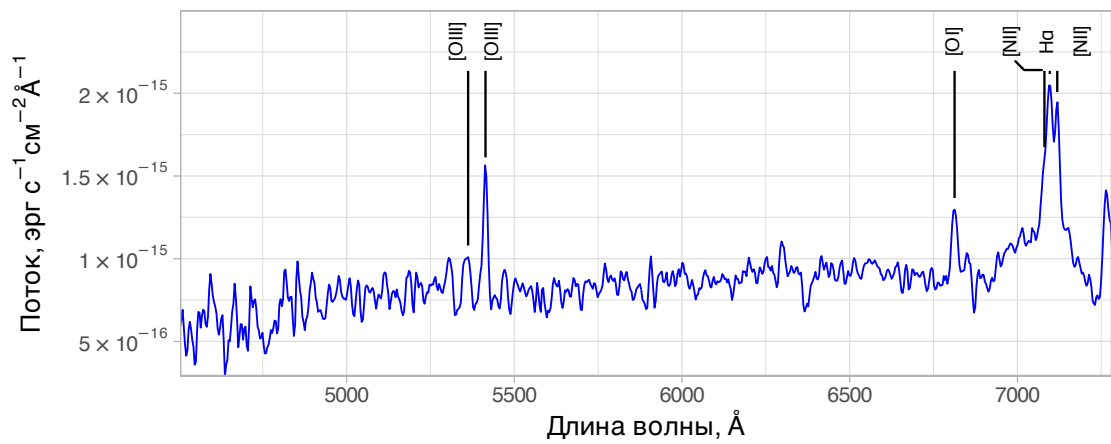
SRGA J165143.2+532539

AZT-33IK



SRGA J181749.5+234311

AZT-33IK



SRGA J191628.1+711619

AZT-33IK

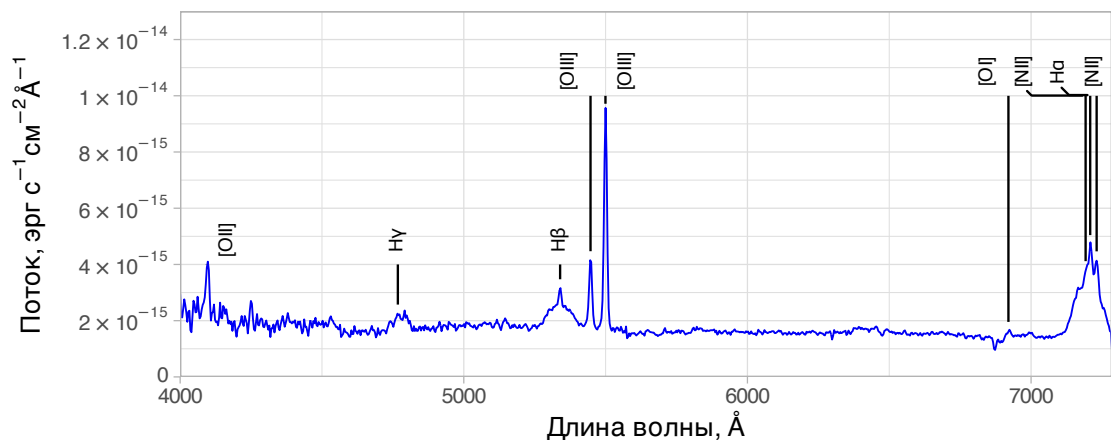
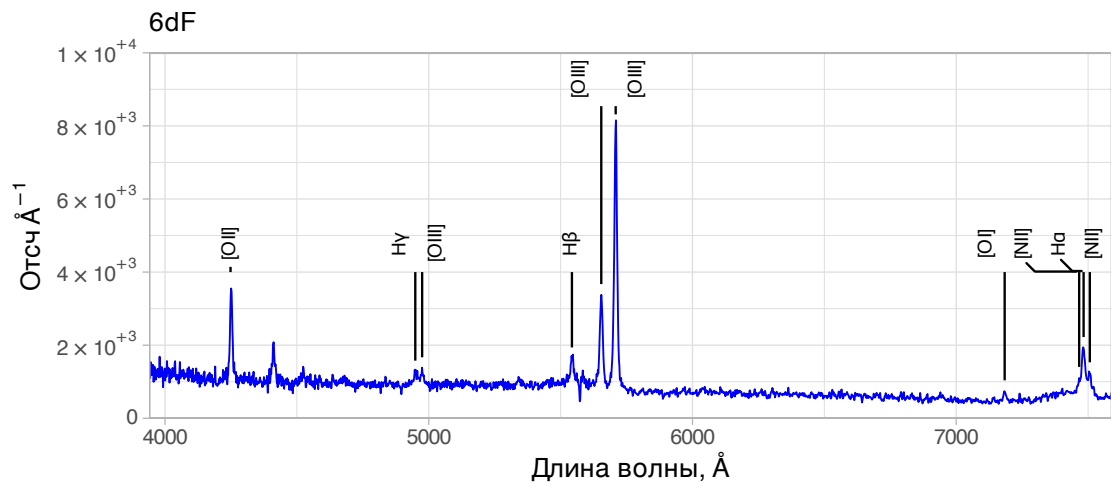
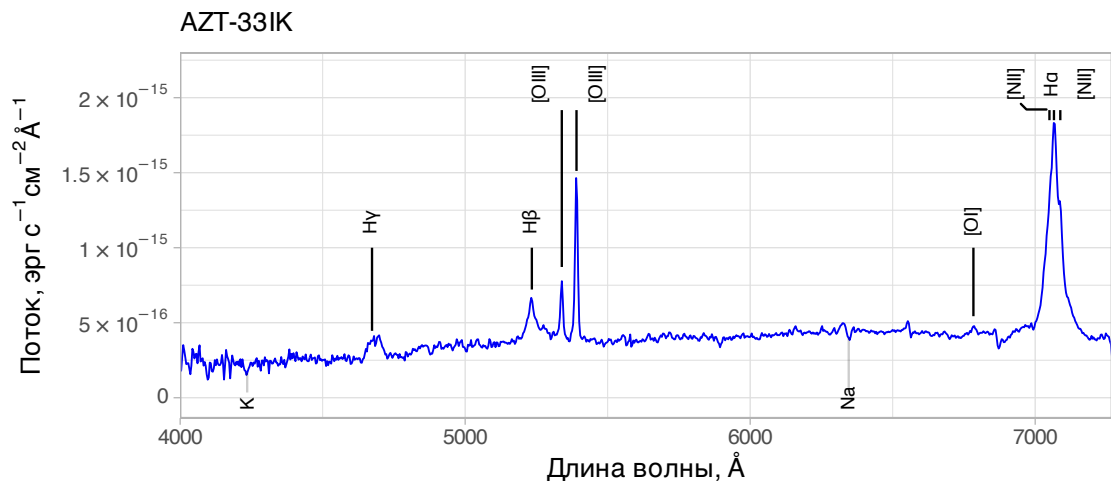


Рисунок 1.3 — Продолжение.

SRGA J194412.5–243619



SRGA J195226.6+380011



SRGA J201633.2+705525



Рисунок 1.3 — Продолжение.

ются нормальному распределению, разыгрывалось 1000 реализаций спектра. Затем для каждой из реализаций оценивалась EW . По полученному распределению EW оценивались доверительные интервалы. Для получения верхнего предела на поток в линии фиксировался центр гауссианы, а её ширина принималась равной приборному уширению. Так как спектры из обзора 6dF (таких – 11) не откалиброваны по потоку, то для них мы определяли только положения, ширины и эквивалентные ширины линий.

Доверительный интервал красного смещения определялся как погрешность среднего красного смещения узких линий в спектре. Для источников из спектроскопического обзора 6dF использовались красные смещения из каталога 6dFGS.

1.5.2 Рентгеновские спектры

Рентгеновское излучение АЯГ может испытывать фотопоглощение в газопылевом торе вокруг сверхмассивной черной дыры (СМЧД) и в межзвездной среде родительской галактики. Одной из целей нашей работы было оценить лучевую концентрацию нейтрального (или слабоионизованного) вещества, N_H , внутри исследуемых объектов. Хотя количества рентгеновских фотонов, зарегистрированных телескопами *ART-XC* и *eROSITA* за короткое время сканирования источников во время обзора неба обсерватории *СРГ*, оказалось недостаточно для проведения детального спектрального анализа, эти данные все же позволили нам получить для большинства объектов достаточно надежные ограничения на N_H , наклон спектра и исправленную за поглощение рентгеновскую светимость.

Для всех четырёх выборок спектральное моделирование проводилось с помощью ПО XSPEC⁵ [44]. В качестве критерия согласия использовалась W -статистика – модифицированная S -статистика [45], в которой учитывается наличие пуассоновского фона вокруг источника. Отличия в моделировании спектров источников разных выборок касались использованных диапазонов энергий (№1 – 0.3–12 кэВ, №2 – 0.2–20 кэВ, №3 – 0.2–12 кэВ, №4 – 0.2–8 кэВ),

⁵<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

версий XSPEC (№1 – v12.9.0n, №2 – v12.11.0n, №№3–4 – v12.12.0) и схем группировки спектров (см. раздел 1.4). Аппроксимация спектров источников выборок №№1–3 проводилась совместно по данным *ART-XC* и *eROSITA*, в то время как для аппроксимации источников выборки №4 было решено использовать только данные *eROSITA*.

Для аппроксимации спектров в качестве базовой использовалась модель степенного континуума с завалом на низких энергиях в результате фотопоглощения в Галактике и в самом объекте. Для выборки №1 наклон степенной компоненты фиксировался на значении $\Gamma = 1.8$ (типичное значение для сейфертовских галактик) из-за малого количества отсчетов в рентгеновских спектрах. Для объектов из выборок №№2–4 наклон рассматривался как свободный параметр модели.

В спектрах шести объектов из выборок №№2–4 мы обнаружили избыток наблюдаемых отсчетов на энергиях ниже ~ 1 кэВ по сравнению с предсказанием базовой модели. Подобные избытки часто наблюдаются у АЯГ как первого, так и второго типа, а их природа активно дискутируется в литературе. В частности, у АЯГ первого типа дополнительное мягкое рентгеновское излучение может возникать в результате комптонизации ультрафиолетового излучения аккреционного диска в “теплой короне” (с температурой в несколько миллионов К), в отличие от основной (степенной) компоненты жесткого рентгеновского излучения, которая, как считается, формируется в “горячей короне” ($T \sim 10^9$ К) аккреционного диска (см., например, [46–48]). Для АЯГ второго типа в качестве возможных механизмов дополнительного излучения обсуждаются (см., например, [49; 50]): 1) излучение центрального источника, рассеяное в разреженном газе за пределами газопылевого тора вокруг СМЧД, 2) излучение газа в ядре галактики, ионизованного и разогретого излучением и/или ударными волнами, связанными с активностью СМЧД, 3) излучение самой галактики, связанное с активным звездообразованием.

Определение точной формы и природы наблюдаемого избытка излучения на низких энергиях требует уточнения матрицы отклика телескопа *eROSITA* и более глубоких экспозиций. Поэтому при аппроксимации спектров источников с таким избытком мы применили упрощенный подход. А именно, для источников из выборки №2 использовали модель чернотельного излучения (ВВ) с фиксированной температурой $kT = 0.1$ кэВ для описания мягкой компоненты в спектре. Для источников из выборок №№3 и 4 мягкую компоненту описыва-

ли с помощью спектра теплового излучения горячей оптически-тонкой плазмы (АРЕС, [51]), при этом обилие металлов данной модели фиксировалось на солнечном ($A^{APES} = 1$) для выборки №3 и было свободным параметром для выборки №4. Для спектров источников из выборки №1 добавление мягкой компоненты в модель вообще не потребовалось.

Таким образом, использовались следующие модели на языке XSPEC:

$$TBabs \times zTBabs \times zpowerlaw, \quad (1.1)$$

$$TBabs \times (zTBabs \times zpowerlaw + APES), \quad (1.2)$$

$$TBabs \times (zTBabs \times zpowerlaw + BB). \quad (1.3)$$

Здесь TBABS [52] описывает поглощение в межзвездной среде Галактики в направлении на исследуемый объект, и при этом используется значение лучевой концентрации нейтрального водорода из данных обзора HI4PI [53]; zTBABS отвечает за поглощение внутри самого объекта на его красном смещении. Отметим, что при аппроксимации спектров из выборок №№1 и 2 использовались немного другие модели поглощения, а именно PHABS для Галактики и ZPHABS для объекта, но это не должно приводить к существенным отличиям по сравнению с моделью поглощения TBABS.

Для определения статистической значимости улучшения качества аппроксимации при добавлении мягкой компоненты к поглощенному степенному континууму мы рассчитывали отношение соответствующих правдоподобий. Согласно теореме Уилкса, $-2(\ln L_1 - \ln L_2)$ асимптотически сходится к распределению χ^2 с количеством степеней свободы, равным разности количества степеней свободы двух моделей, одна из которых вложена в другую. В нашем случае $-2\ln L_1$ и $-2\ln L_2$ соответствуют значениям $Cstat$ для модели с мягкой компонентой и модели без такой компоненты соответственно. Если вероятность того, что улучшение качества аппроксимации при добавлении мягкой компоненты произошло случайно, составляет более 95%, то предпочтение отдавалось двукомпонентной модели. Это соответствует порогам $\Delta Cstat = 3.8, 6.0, 7.8$ для $dof = 1, 2, 3$ степеней свободы, соответственно.

Результаты аппроксимации рентгеновских спектров приведены в табл. 1.3. Доверительные интервалы значений параметров приведены на уровне 90%. Сами спектры (данные, наилучшие модели и невязки) представлены на рис. 1.4, при этом спектры *eROSITA* были перебинированы для наглядности. Для выборки №1 спектры представлены в единицах $F_E(E)$, при этом для пересчета

отсчетов в фотоны использовалась степенная модель с наклоном $\Gamma = 1.8$. Следует иметь в виду, что такие рисунки не должны использоваться для получения точных значений потоков. Спектры объектов для выборок №№2–4 представлены в отсчетах.

Повторим, что при интерпретации приведенных в табл. 1.3 значений спектральных параметров необходимо иметь в виду, что окончательный вывод о природе мягкого рентгеновского избытка требует дальнейшего исследования и уточнения матрицы отклика телескопа *eROSITA*. Однако важно отметить, что параметры основного рентгеновского континуума (наклон и лучевая концентрация водорода) статистически незначимо меняются при добавлении в модель мягкой компоненты.

В выборке №4 выделяется источник SRGA J000132.9+240237 (сейферт 1.9), спектр которого выглядит очень жестким по сравнению с остальными. При его описании моделью степенного континуума наклон спектра оказывается $\Gamma < 0.5$ (см. табл. 1.3), что кардинально отличается от характерных для АЯГ значений $\Gamma \sim 1.8$. Более того, такие жесткие степенные спектры невозможно получить в результате комптонизации в горячей плазме (см., например, [54]). Наши попытки “исправить” наклон степенной компоненты с помощью добавления мягкой компоненты не увенчались успехом. Вероятно, в случае SRGA J000132.9+240237 мы имеем дело с сильно поглощенным АЯГ, основной вклад в спектр которого вносит излучение, отраженное от газопылевого тора. Для описания отраженной компоненты мы попробовали использовать модель PEXRAV [55]. Хотя эта модель изначально предназначена для описания отражения степенного континуума от плоской поверхности оптически толстой нейтральной среды, она должна примерно правильно описывать форму спектра отраженной компоненты и при других геометриях, в частности в случае отражения степенного континуума от газопылевого тора (см., например, [56]).

На языке XSPEC получившаяся двухкомпонентная модель выглядит так (далее – модель PL+PEXRAV):

$$TBabs \times (zTBabs \times zpowerlaw + PEXRAV). \quad (1.4)$$

При этом нормировочный коэффициент rel_{ref} модели PEXRAV задавался отрицательным, чтобы оставить в этой компоненте только вклад отраженного излучения (т.к. прямая компонента уже учтена в ZPOWERLAW). В отношении прочих параметров модели PEXRAV были сделаны следующие предположения:

1) наклон спектра падающего континуума был привязан к наклону компоненты *zPOWERLAW*, 2) завал спектра на высоких энергиях не вводился, 3) химический состав отражающей среды был зафиксирован на солнечных значениях, 4) косинус угла наклона был взят равным 0.5, 5) нормировка была привязана к нормировке компоненты *zPOWERLAW*. Все эти предположения не оказывают практически никакого влияния на качество аппроксимации спектра.

К сожалению, из-за недостаточной статистики (25.7 фотонов за вычетом фона в данных *eROSITA*) не удастся получить сколь-нибудь полезных ограничений на параметры модели *PL+PEXRAV*. С другой стороны, как уже говорилось выше, полученный в модели степенного континуума наклон $\Gamma < 0.5$ указывает на то, что в спектре доминирует излучение, отраженное от газопылевого тора. Поэтому мы упростили модель *PL+PEXRAV*: наклон спектра был зафиксирован на “каноническом” для АЯГ значении $\Gamma = 1.8$, а компонента, описывающая прямое излучение, была исключена, что в рамках стандартной модели АЯГ соответствует такой ориентации, при которой прямое излучение полностью скрыто тором. Такая модель (*PEXRAV*) описывается следующим выражением:

$$TBabs \times PEXRAV. \quad (1.5)$$

Согласно полученным значениям *Cstat*, эта модель позволяет описать спектр источника *SRGA J000132.9+240237* так же хорошо, как и модель поглощенного степенного континуума.

Чтобы лучше изучить свойства этого интересного АЯГ, необходимо получить рентгеновский спектр с хорошей статистикой в широком интервале энергий, желательно до $\sim 50\text{--}100$ кэВ. Это позволит использовать более физически обоснованные модели для описания переноса излучения в рамках модели газопылевого тора.

Таблица 1.3 — Рентгеновские спектральные параметры.

Источник <i>ART-XC</i>	N_{H}^{MW}	N_{H}	Γ	F_{4-12}^{PL}	kT	$F_{0.5-10}^{\text{APEC/BB}}$	A^{APEC}	$Cstat$ (dof)
Выборка №1								
SRGA J043209.6+354917	2.6	$3.0^{+0.8}_{-0.7}$	1.8 (фикс.)	107^{+62}_{-53}				—
SRGA J045049.8+301449	2.2	38^{+11}_{-10}	1.8 (фикс.)	110^{+64}_{-55}				—
SRGA J152102.3+320418	0.2	25^{+6}_{-6}	1.8 (фикс.)	40^{+24}_{-24}				—
SRGA J200431.6+610211	1.0	$4.4^{+2.2}_{-1.4}$	1.8 (фикс.)	50^{+29}_{-25}				—
SRGA J224125.9+760343	1.7	< 0.4	1.8 (фикс.)	33^{+19}_{-25}				—
SRGA J232446.8+440756	1.3	> 300	1.8 (фикс.)	122^{+71}_{-61}				—
Выборка №2								
SRGA J025234.3+431004	1.0	78^{+391}_{-71}	$0.6^{+2.4}_{-1.3}$	24^{+49}_{-12}				12 (10)
SRGA J070636.4+635109	0.4	< 0.2	$1.1^{+0.2}_{-0.2}$	19^{+9}_{-7}				68 (53)
	0.4	< 4.8	$1.0^{+0.5}_{-0.4}$	23^{+15}_{-10}	0.1 (фикс.)	$0.6^{+0.3}_{-0.4}$		61 (52)
SRGA J092021.6+860249	0.5	< 0.2	$2.2^{+0.1}_{-0.1}$	10^{+2}_{-2}				230 (212)
SRGA J195702.4+615036	0.7	< 0.3	$1.7^{+0.1}_{-0.1}$	23^{+5}_{-4}				289 (283)
SRGA J221913.2+362014	1.0	80^{+53}_{-41}	$1.8^{+1.0}_{-0.9}$	22^{+12}_{-9}				19 (14)
SRGA J223714.9+402939	1.2	< 0.6	$1.4^{+0.1}_{-0.1}$	52^{+11}_{-9}				183 (189)
	1.2	$2.3^{+1.6}_{-1.5}$	$1.7^{+0.3}_{-0.3}$	41^{+15}_{-12}	0.1 (фикс.)	$2.9^{+1.2}_{-1.5}$		177 (189)
SRGA J232037.8+482329	1.3	< 0.4	$1.5^{+0.2}_{-0.2}$	14^{+5}_{-4}				119 (92)
SRGA J235250.6–170449	0.2	$1.7^{+0.7}_{-0.6}$	$1.3^{+0.2}_{-0.2}$	60^{+21}_{-17}				94 (120)
Выборка №3								
SRGA J001439.6+183503	0.4	109^{+85}_{-57}	$1.6^{+1.8}_{-1.4}$	41^{+35}_{-15}				33.6 (19)
		115^{+88}_{-57}	$1.7^{+1.8}_{-1.4}$	41^{+35}_{-15}	$0.77^{+0.29}_{-0.22}$	$0.14^{+0.11}_{-0.08}$	1 (фикс.)	21.8 (17)
SRGA J002240.8+804348	1.4	$0.4^{+0.3}_{-0.3}$	$1.90^{+0.16}_{-0.15}$	22^{+4}_{-3}				265.2 (279)
SRGA J010742.9+574419	3.2	< 3.1	$1.9^{+0.4}_{-0.4}$	9^{+3}_{-3}				123.1(118)
SRGA J021227.3+520953	1.5	< 0.8	$2.04^{+0.37}_{-0.14}$	$6.4^{+1.3}_{-1.3}$				146.5 (155)
SRGA J025208.4+482955	1.8	$3.2^{+1.4}_{-1.2}$	$1.7^{+0.4}_{-0.3}$	16^{+5}_{-4}				110.5 (104)

Продолжение таблицы 1.3

Источник <i>ART-XC</i>	N_{H}^{MW}	N_{H}	Γ	F_{4-12}^{PL}	kT	$F_{0.5-10}^{\text{BB/APEC}}$	A^{APEC}	Cstat (dof)
SRGA J045432.1+524003	3.4	$7.7^{+2.9}_{-2.5}$	$1.5^{+0.3}_{-0.3}$	56^{+12}_{-10}				102.1 (102)
SRGA J051313.5+662747	0.9	11^{+5}_{-4}	$1.5^{+0.6}_{-0.5}$	28^{+9}_{-7}				71.0 (60)
		15^{+7}_{-5}	$1.9^{+0.7}_{-0.6}$	23^{+7}_{-6}	$0.24^{+0.19}_{-0.19}$	$0.28^{+0.21}_{-0.17}$	1(фикс.)	58.9 (58)
SRGA J110945.8+800815	0.4	$1.8^{+2.5}_{-1.7}$	$0.7^{+0.5}_{-0.4}$	16^{+8}_{-6}				50.3 (47)
SRGA J161251.4–052100	1.0	12^{+4}_{-3}	$1.9^{+0.5}_{-0.5}$	19^{+6}_{-5}				73.0 (80)
SRGA J161943.7–132609	1.5	< 3.5	$0.9^{+0.5}_{-0.3}$	26^{+10}_{-8}				87.0 (82)
SRGA J182109.8+765819	0.5	34^{+16}_{-13}	$1.1^{+0.8}_{-0.6}$	15^{+4}_{-4}				62.8 (58)
SRGA J193707.6+660816	0.8	$0.32^{+0.14}_{-0.13}$	$2.33^{+0.10}_{-0.09}$	$7.3^{+0.8}_{-0.7}$				379.8 (350)
SRGA J200331.2+701332	1.0	$2.2^{+0.4}_{-0.4}$	$2.00^{+0.15}_{-0.14}$	$10.6^{+1.6}_{-1.4}$				352.8 (314)
SRGA J211149.5+722815	1.5	8^{+5}_{-4}	$1.2^{+0.5}_{-0.4}$	13^{+4}_{-3}				112.1 (119)
		14^{+5}_{-4}	$1.6^{+0.5}_{-0.4}$	10^{+3}_{-2}	$0.46^{+0.25}_{-0.17}$	$0.14^{+0.09}_{-0.07}$	1(фикс.)	97.6 (117)
Выборка №4								
SRGA J000132.9+240237	0.4	< 9	$-0.5^{+0.9}_{-0.8}$	20^{+36}_{-16}				11.3 (12)
SRGA J001059.5+424341	0.7	< 0.5	$2.20^{+0.25}_{-0.15}$	$5.4^{+1.6}_{-1.8}$				168.4 (171)
SRGA J023800.1+193818	0.8	< 0.2	$2.29^{+0.18}_{-0.08}$	4.8 ± 1.3				168 (183)
SRGA J025900.3+502958	2.9	$1.1^{+0.9}_{-0.8}$	$2.2^{+0.4}_{-0.3}$	9^{+5}_{-3}				111.4 (140)
SRGA J040335.6+472440	5.2	< 1.9	$1.9^{+0.4}_{-0.2}$	16^{+7}_{-6}				110.3 (98)
SRGA J165143.2+532539	0.5	< 0.15	$1.28^{+0.12}_{-0.07}$	$13.7^{+1.3}_{-2.5}$				302.9 (256)
	0.5	9^{+3}_{-2}	$2.5^{+0.5}_{-0.4}$	5^{+3}_{-2}	$0.24^{+0.04}_{-0.02}$	1.39 ± 0.16	$0.07^{+0.06}_{-0.04}$	248.3 (253)
SRGA J181749.5+234311	1.2	16^{+5}_{-4}	$2.0^{+0.6}_{-0.5}$	29^{+18}_{-12}				113.3 (88)
SRGA J191628.1+711619	0.9	$0.45^{+0.19}_{-0.18}$	2.08 ± 0.11	$8.1^{+1.4}_{-1.2}$				358.4 (365)
SRGA J194412.5–243619	0.8	< 0.5	$0.66^{+0.23}_{-0.17}$	53^{+11}_{-18}				87.4 (61)
SRGA J195226.6+380011	2.2	< 0.6	$2.22^{+0.31}_{-0.15}$	9 ± 3				138.3 (164)
SRGA J201633.2+705525	1.0	$1.6^{+0.7}_{-0.6}$	$1.9^{+0.3}_{-0.2}$	$4.0^{+1.7}_{-1.3}$				212.3 (215)

Таблица 1.3 — Рентгеновские спектральные параметры (продолжение): модель с отражением.

Источник <i>ART-XC</i>	N_{H}^{MW}	Γ	F_{4-12}^{PEXRAV}	$\cos i$	A^{PEXRAV}	Cstat (dof)
Выборка №4						
SRGA J000132.9+240237	0.4	1.8 (фикс.)	13_{-5}^{+6}	0.5 (фикс.)	1 (фикс.)	10.9 (14)

N_{H}^{MW} , N_{H} — лучевые концентрации газа в Галактике и внутри АЯГ соответственно (в единицах 10^{21} атомов Н на кв. см); F_{4-12}^{PL} — исправленный за галактическое и внутреннее поглощение поток степенной компоненты в диапазоне 4–12 кэВ (10^{-13} эрг с^{-1} см^{-2}); Γ — наклон степенной компоненты; kT — температура плазмы или черного тела в модели АРЕС или ВВ соответственно (кэВ). $F_{0.5-10}^{APEC/BB}$ — исправленный за поглощение в Галактике поток мягкой компоненты (АРЕС или ВВ) в диапазоне 0.5–10 кэВ (10^{-13} эрг с^{-1} см^{-2}); $A^{\text{АРЕС}}$, A^{PEXRAV} — обилие металлов по отношению к солнечному в модели АРЕС или PEXRAV; F_{4-12}^{PEXRAV} — исправленный за поглощение в Галактике поток компоненты PEXRAV в диапазоне 4–12 кэВ; $\cos I$ — косинус угла наклона в модели PEXRAV. Для источников выборки №1 значения Cstat не указаны, так как они не были приведены в оригинальной статье [25], однако для всех этих объектов было достигнуто удовлетворительное качество аппроксимации спектра.

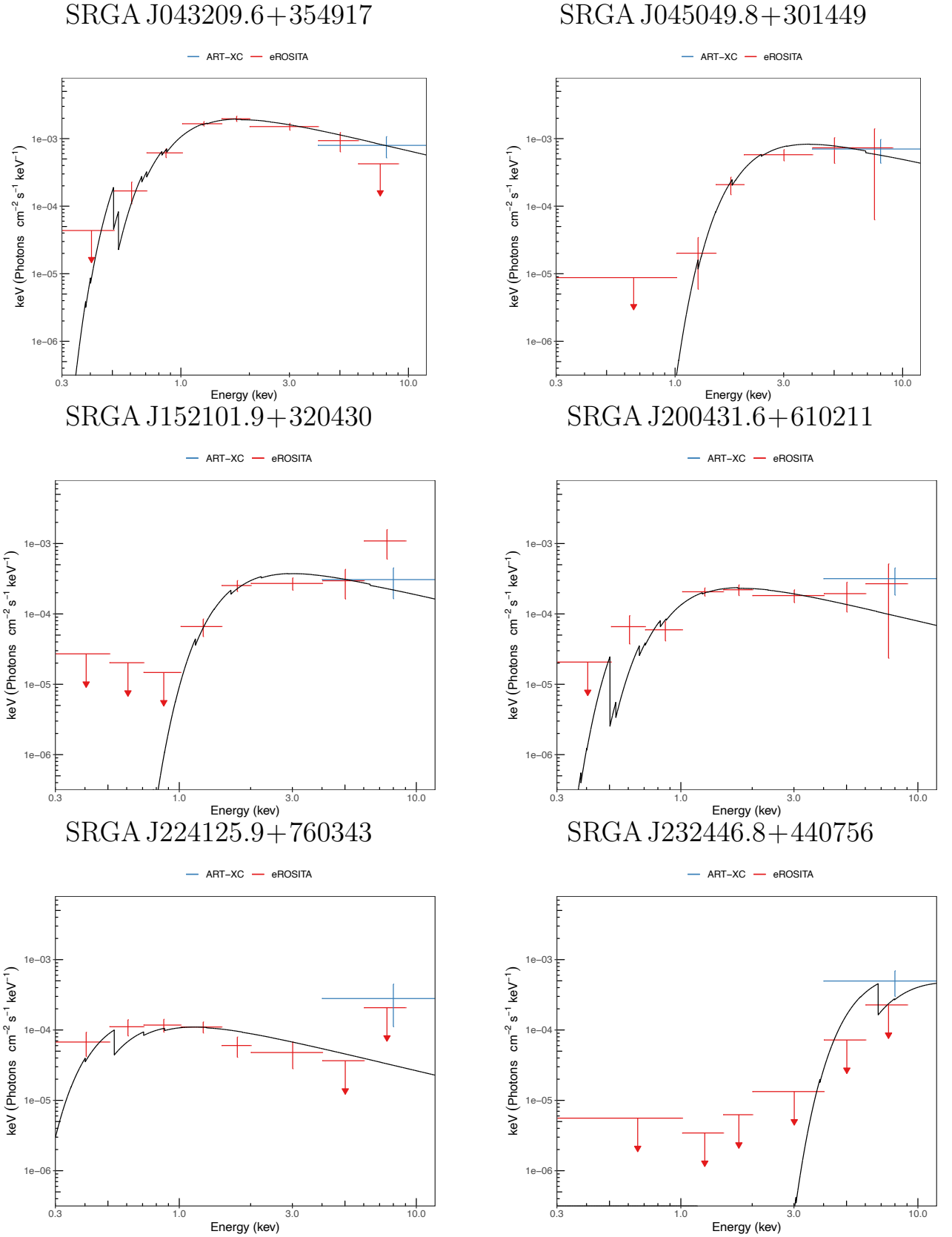


Рисунок 1.4 — Рентгеновские спектры по данным телескопов *ART-XC* (синим) и *eROSITA* (красным), а также модели наилучшей аппроксимации из табл. 1.3. Стрелками показаны верхние пределы.

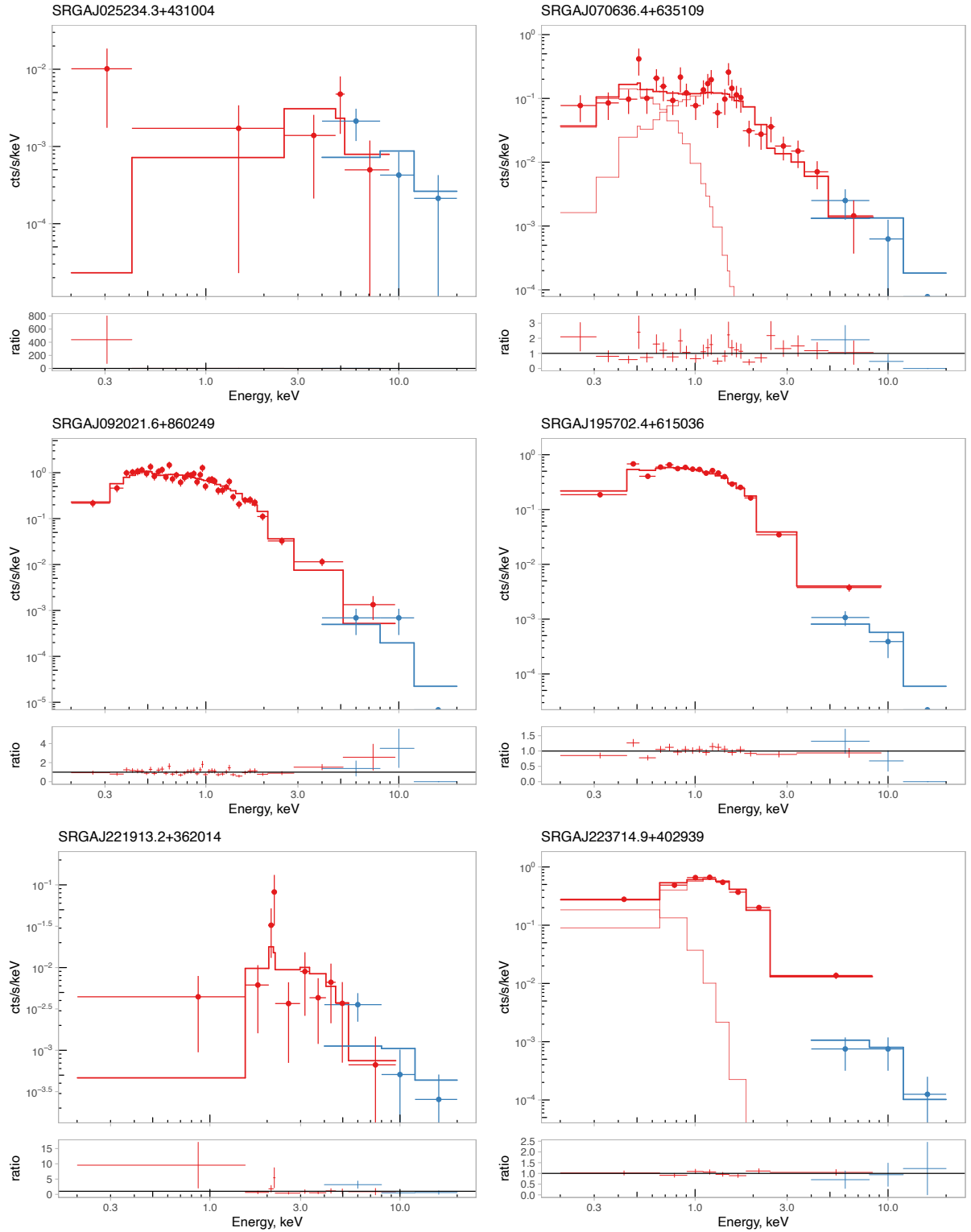


Рисунок 1.4 — Продолжение. Под каждым спектром нарисовано отношение данных к модели. Для источников SRGA J070636.4+635109 и SRGA J223714.9+402939 показаны мягкие компоненты модели PL+BB.

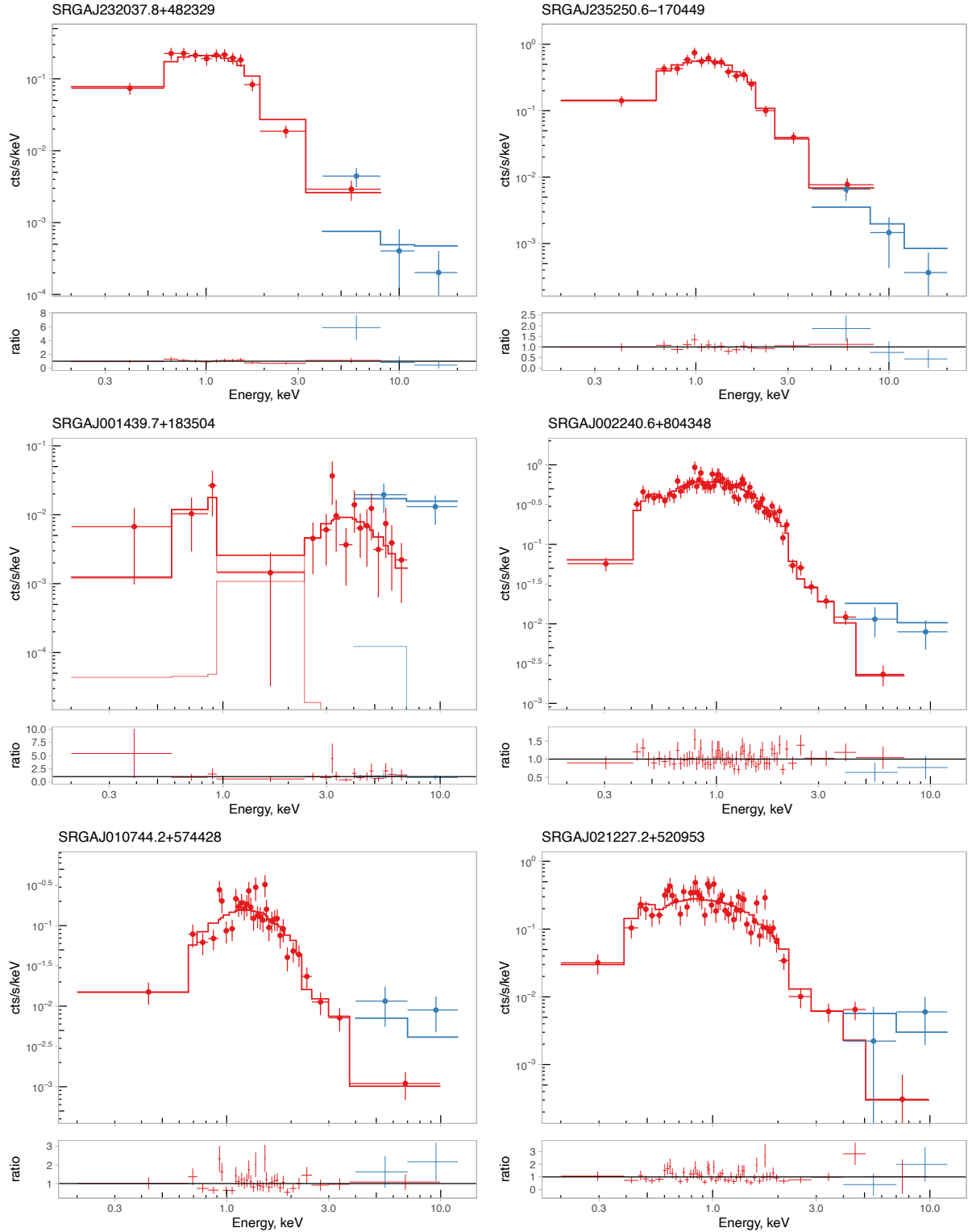


Рисунок 1.3 — Продолжение. Для источника SRGA J001439.6+183503 показана мягкая компонента модели PL+APEC.

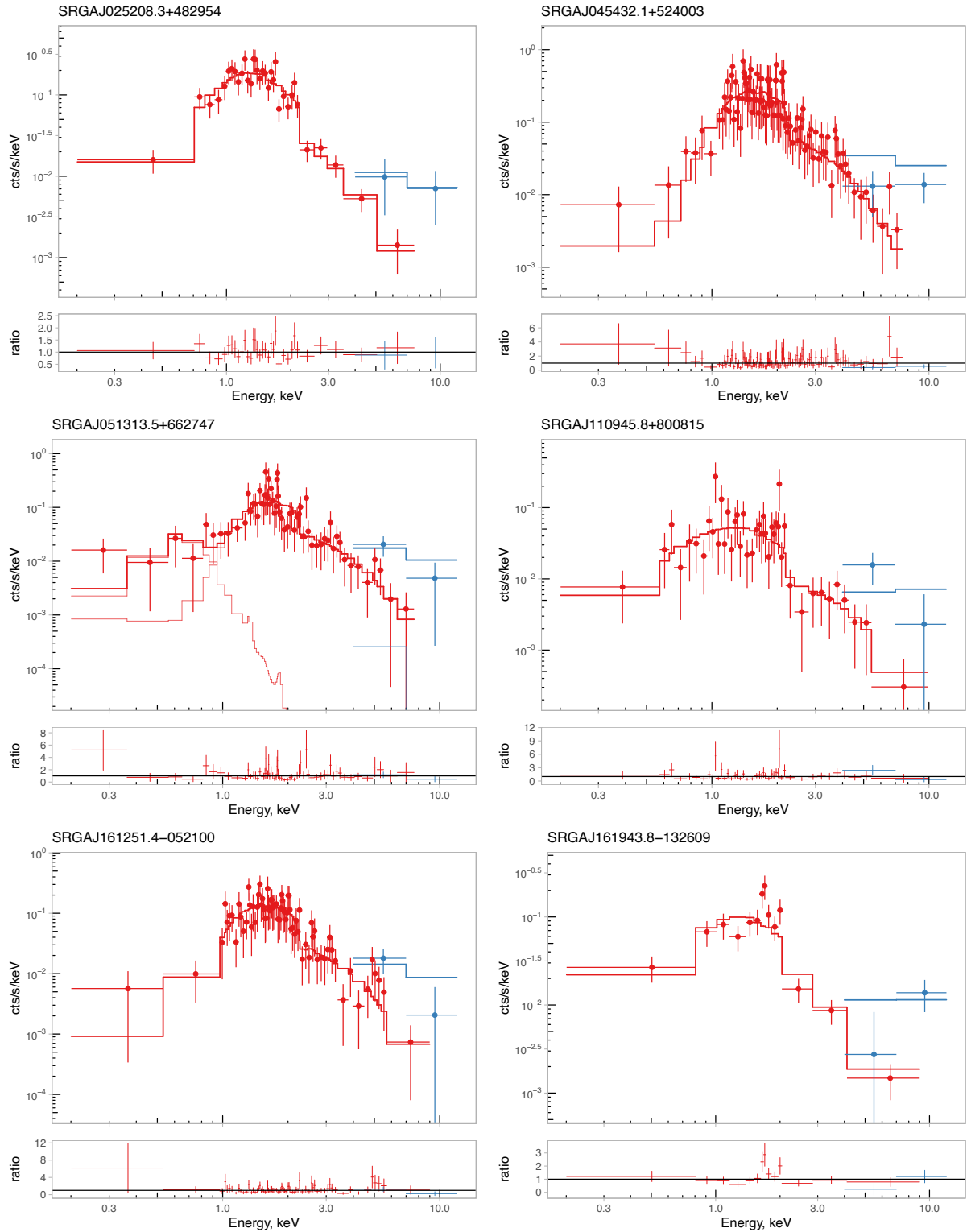


Рисунок 1.3 — Продолжение. Для источника SRGA J051313.5+662747 показана мягкая компонента модели PL+APEC.

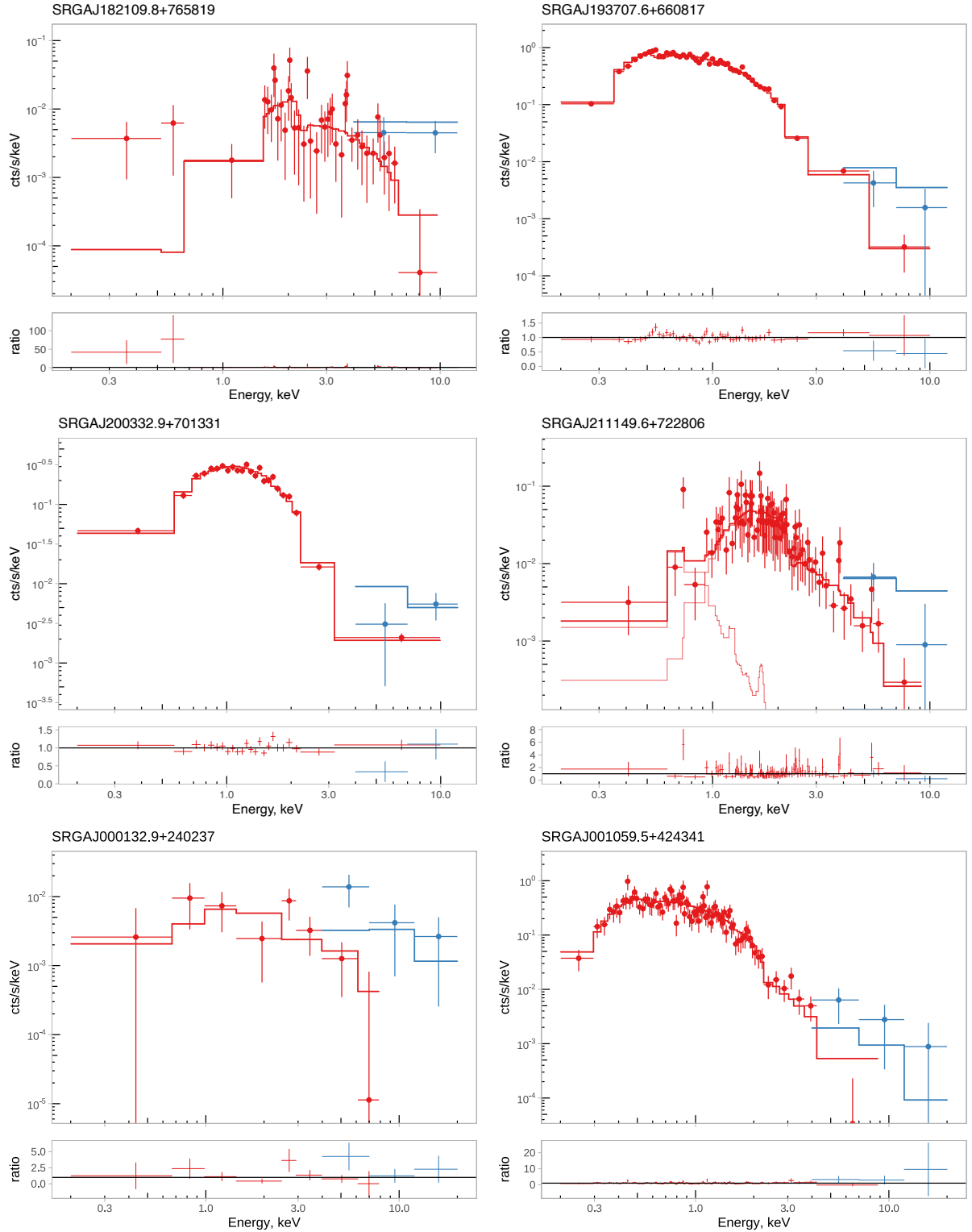


Рисунок 1.3 — Продолжение. Для источника SRGA J211149.5+722815 показана мягкая компонента модели $PL+APEC$.

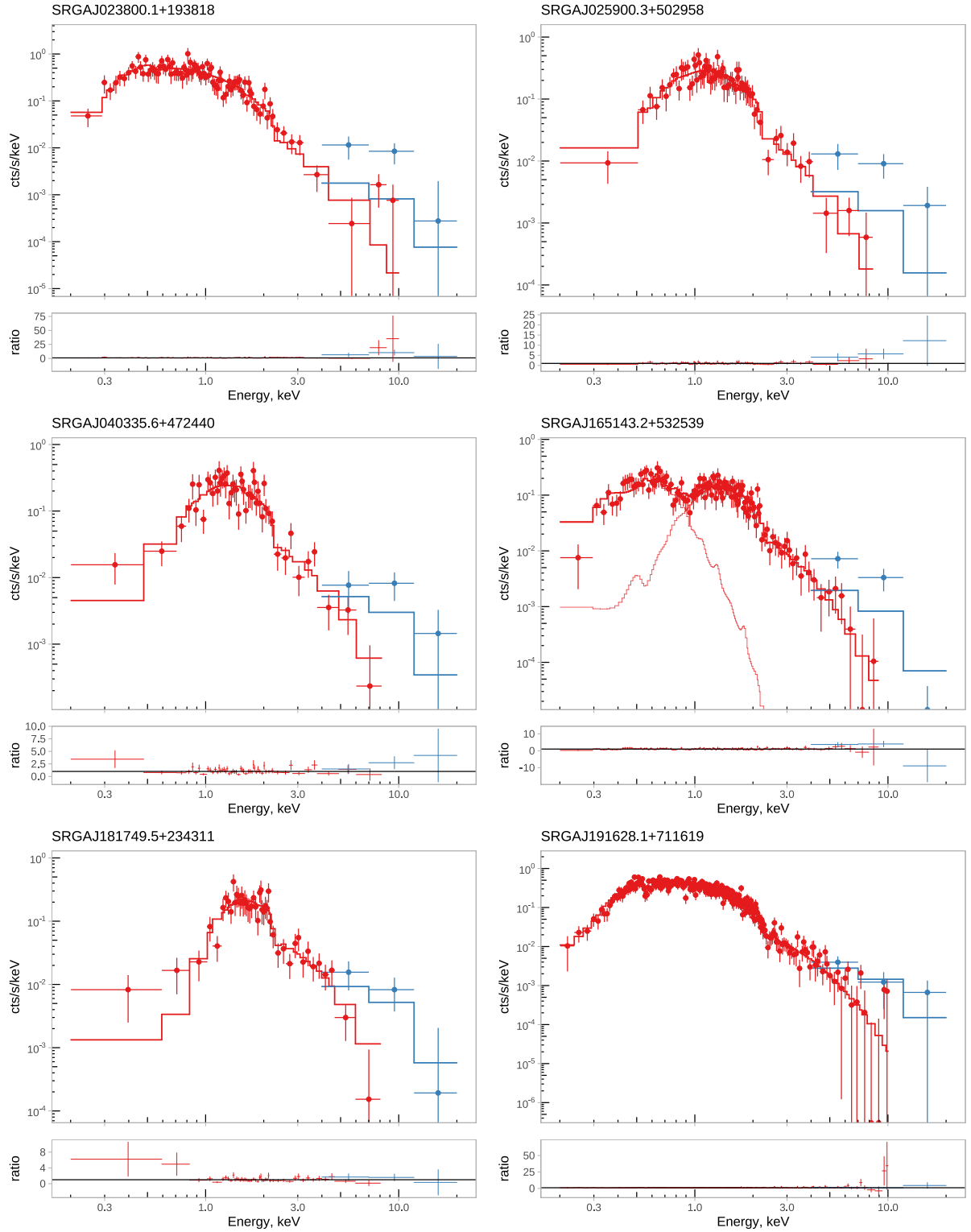


Рисунок 1.3 — Продолжение.

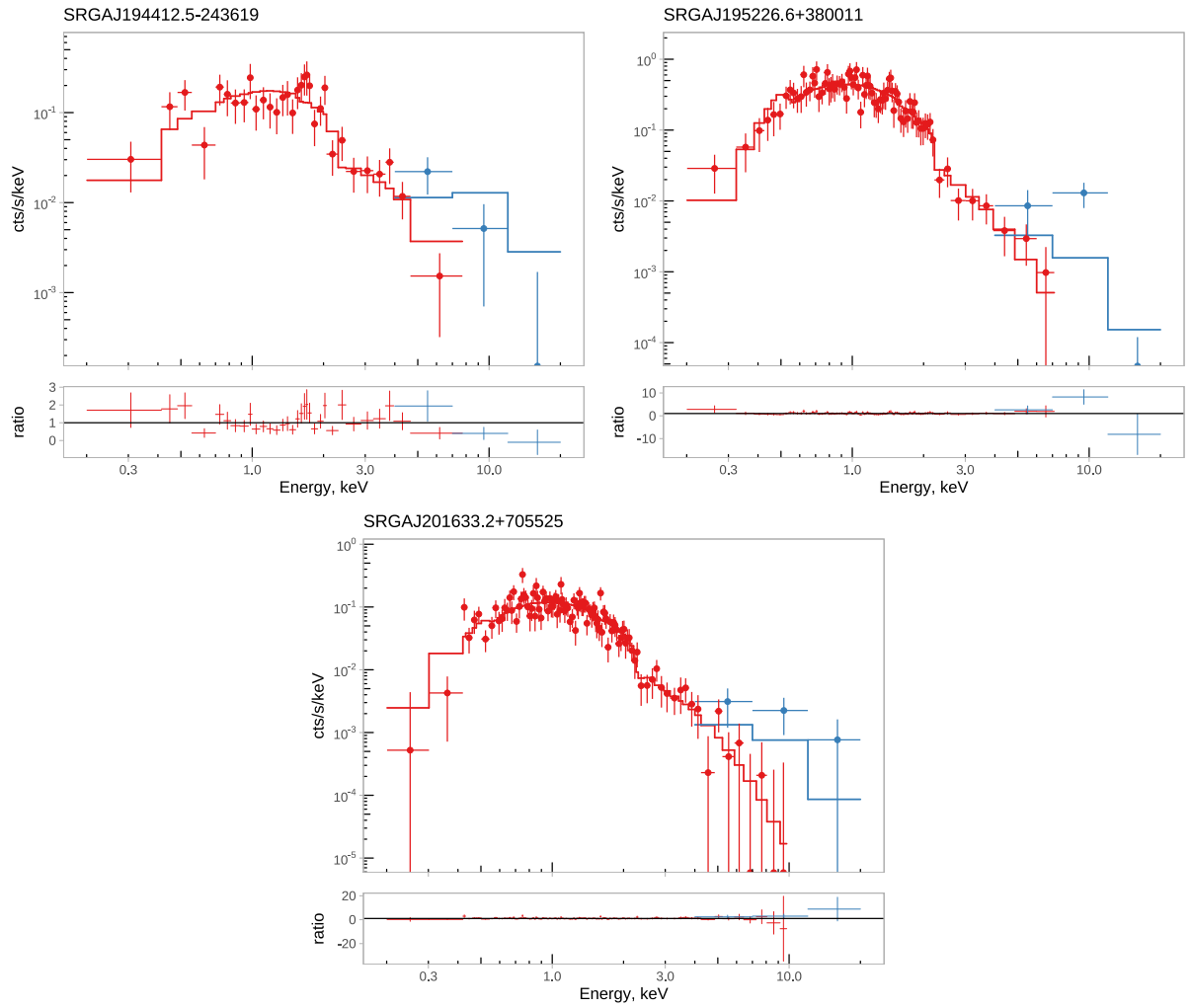


Рисунок 1.3 — Продолжение.

1.5.3 Классификация объектов

В табл. 1.4 для всех исследованных АЯГ представлены определенные по оптическим спектрам красные смещения и типы объектов. Кроме того, приведены соответствующие оценки рентгеновских светимостей. Отметим, для двух источников (SRGA J070636.4+635109 и SRGA J052959.8–340157) из выборки №2 в оригинальной публикации [28] класс объекта был указан не совсем точно как Sy1.8, хотя их правильней отнести к классу Sy1.9, как написано в таблице 1.4.

Для оптической классификации активных ядер галактик мы использовали стандартные критерии, основанные на соотношении потоков в эмиссионных линиях [57; 58] и их ширинах:

- Разделение на сейфертовские галактики первого (Sy1) и второго (Sy2) типа производится по наличию широких компонент у разрешенных линий, таких как бальмеровские линии водорода. У объектов Sy1 видны широкие компоненты (как правило, $\text{FWHM} > 2 \times 10^3 \text{ км с}^{-1}$), а у объектов Sy2 ширина разрешённых линий сопоставима с шириной запрещённых линий ($\text{FWHM} \lesssim 5 \times 10^2 \text{ км с}^{-1}$) [57].
- Промежуточные типы определяются по относительной выраженности широкой компоненты у бальмеровских линий: Sy1.5 – широкая и узкая компоненты $H\beta$ сравнимы по интенсивности; Sy1.8 – присутствует слабая широкая компонента у $H\beta$; Sy1.9 – слабая широкая компонента имеется только у $H\alpha$.
- Спектры сейфертовских галактик первого типа с узкими линиями (NLSy1) характеризуются относительно «узкими» широкими бальмеровскими линиями ($\text{FWHM} \lesssim 2000 \text{ км с}^{-1}$) и сильной эмиссией в квази-континууме FeII.
- Объекты без признаков широких линий в спектре классифицируются по отношению потоков в узких линиях $\lg([NII]\lambda 6584/H\alpha)$ и $\lg([OIII]\lambda 5007/H\beta)$ как сейфертовские галактики (а не звездообразующие/LINER) с помощью BPT-диаграммы ("Baldwin, Phillips & Terlevich") [59]. В частности для сейфертов обычно $[O III]/H\beta \gtrsim 3$.

На рис. 1.4 показана BPT-диаграмма для наших объектов. С помощью нее удалось классифицировать все источники, кроме четырех, для которых оказалось невозможно выделить узкие бальмеровские линии. Тем не менее эти

объекты по другим признакам были отнесены к сейфертовским галактикам разных типов. А именно:

- У SRGA J224125.9+760343 не удается надежно различить линию [NII] λ 6583, но наличие относительно широкой $H\alpha$ ($FWHM = 2300 \pm 100$ км с⁻¹) позволяет отнести его к NLSy1.
- В спектре SRGA J001439.6+183503 отсутствует линии [OIII] λ 5007 и $H\beta$, но высокая рентгеновская светимость ($\sim 3 \times 10^{42}$ эрг с⁻¹) в диапазоне 4–12 кэВ и наличие только узкой компоненты $H\alpha$ позволяет отнести его к Sy2;
- В спектре SRGA J002240.8+804348 невозможно надежно выделить узкие линии $H\alpha$ и [NII] λ 6583, однако наличие широких компонент $H\alpha$ и $H\beta$ говорит о том, что это Sy1;
- У SRGA J201633.2+705525 область $H\alpha$ оказалась за пределами спектрального диапазона, но наличие широкой компоненты $H\beta$ позволяет классифицировать объект как Sy1.

Большинство объектов лежат на BPT-диаграмме в области сейфертовских галактик, но есть несколько неоднозначных случаев:

- SRGA J070636.4+635109, согласно BPT-диаграмме, может быть как АЯГ низкой светимости (LINER), так и сейфертовской галактикой, но наличие широкой компоненты $H\alpha$, отсутствие линии $H\beta$ и высокая рентгеновская светимость ($L_X = 6_{-2}^{+4} \times 10^{44}$ эрг с⁻¹) позволяют отнести его к классу Sy1.9.
- SRGA J235250.6–170449, согласно BPT-диаграмме, может быть либо звездообразующей галактикой, либо галактикой с композитным спектром, либо (на границе доверительного интервала) сейфертовской галактикой. Однако наличие широких компонент у линий $H\alpha$ и $H\beta$ позволяет однозначно классифицировать объект как Sy1.
- SRGA J010742.9+574419 попадает в область галактик с композитным спектром – вероятно, из-за того, что мы не можем для него надежно выделить узкие линии $H\alpha$ и [NII] λ 6583, но наличие широкой компоненты $H\alpha$ с $FWHM = 3750 \pm 120$ км с⁻¹ позволяет классифицировать объект как Sy1.9.

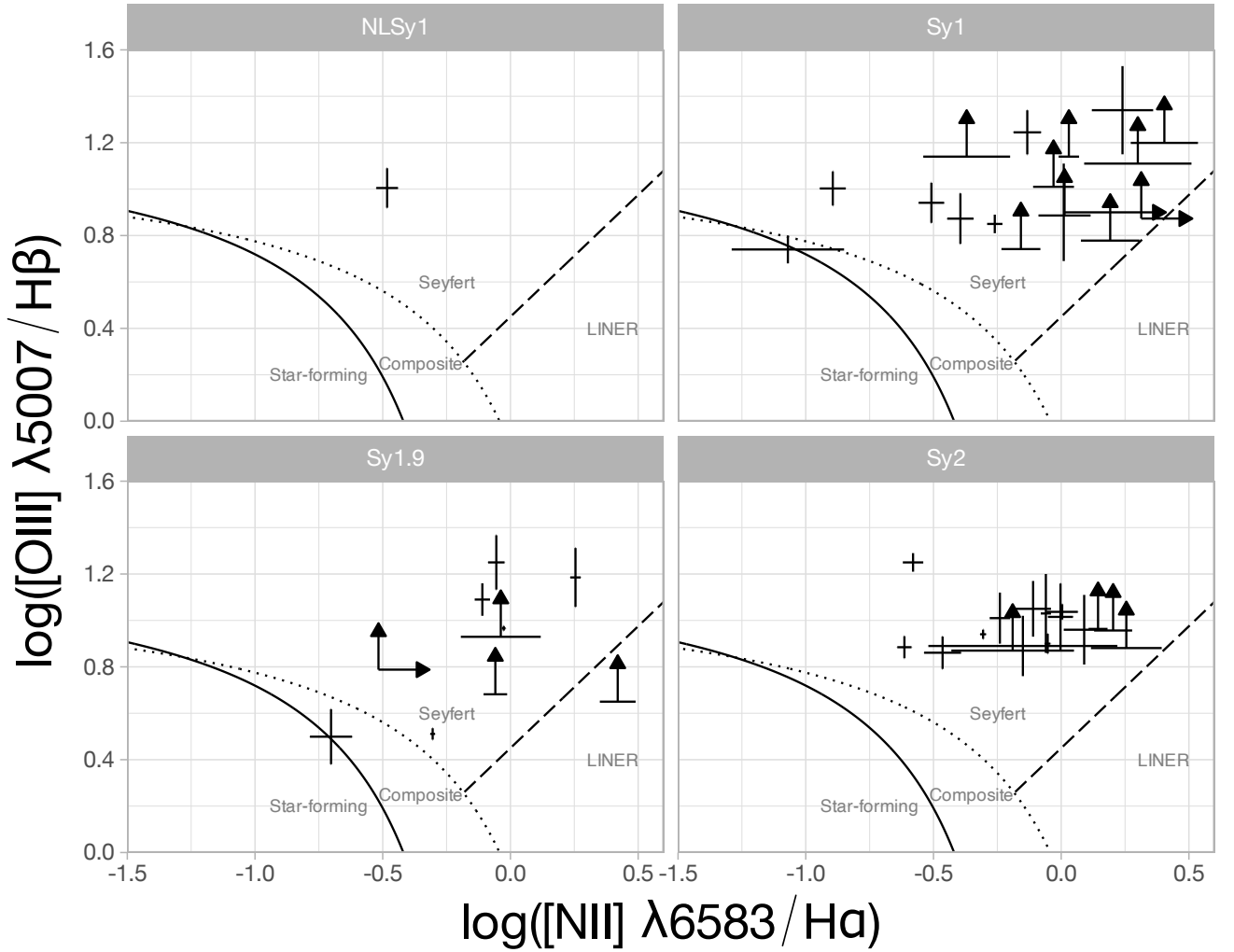


Рисунок 1.4 — Расположение исследуемых АЯГ на ВРТ-диаграмме [59]. Для лучшего восприятия диаграмма нарисована отдельно для четырех типов сейфертовских галактик (согласно нашим выводам). Показаны 1σ доверительные интервалы отношений потоков. Стрелками указаны нижние 2σ -пределы. Разграничительные линии между разными классами галактик взяты из работ: [60] — сплошная линия, [61] — пунктирная линия, [62] — штриховая линия.

Таблица 1.4 — Свойства активных ядер галактик

Объект	Оптический тип	z^1	$\log L_X^2$
Выборка №1			
SRGA J043209.6+354917	Sy1	0.0506 ± 0.0010	$43.8^{+0.2}_{-0.3}$
SRGA J045049.8+301449	Sy1.9	0.03308 ± 0.00004	$43.4^{+0.2}_{-0.3}$
SRGA J152102.3+320418	Sy2	0.1143 ± 0.0003	$44.1^{+0.2}_{-0.4}$
SRGA J200431.6+610211	Sy2	0.05866 ± 0.00013	$43.6^{+0.2}_{-0.3}$
SRGA J224125.9+760343	NLSy1	0.2834 ± 0.0004	$44.9^{+0.2}_{-0.6}$
SRGA J232446.8+440756	Sy2	0.0462 ± 0.0002	$43.8^{+0.2}_{-0.3}$
Выборка №2			
SRGA J025234.3+431004	Sy2	0.05123 ± 0.00024	$43.2^{+0.5}_{-0.3}$
SRGA J062627.2+072734	Sy1	0.04254 ± 0.00013	$43.0 \pm 0.7^*$
SRGA J070636.4+635109	Sy1.9	0.01404 ± 0.00019	$42.0^{+0.2}_{-0.2}$
SRGA J092021.6+860249	Sy1	0.05286 ± 0.00013	$42.82^{+0.08}_{-0.10}$
SRGA J195702.4+615036	Sy1	0.05857 ± 0.00014	$43.28^{+0.09}_{-0.08}$
SRGA J221913.2+362014	Sy2	0.14667 ± 0.00003	$44.11^{+0.19}_{-0.23}$
SRGA J223714.9+402939	Sy1	0.05818 ± 0.00011	$43.52^{+0.14}_{-0.15}$
SRGA J232037.8+482329	Sy2	0.04197 ± 0.00017	$42.76^{+0.13}_{-0.15}$
SRGA J235250.6–170449	Sy1	0.05502 ± 0.00012	$43.64^{+0.13}_{-0.14}$
SRGA J030838.1–552041	Sy2	0.07791	$43.8 \pm 0.3^*$
SRGA J052959.8–340157	Sy1.9	0.07900	$43.8 \pm 0.3^*$
SRGA J055053.7–621457	Sy1	0.05875	$43.0 \pm 0.3^*$
SRGA J060241.1–595152	Sy2	0.10051	$43.8 \pm 0.3^*$
SRGA J061322.9–290027	Sy2	0.07051	$44.1 \pm 0.16^*$
SRGA J063324.9–561424	Sy2	0.04784	$43.2 \pm 0.3^*$
SRGA J064421.5–662620	Sy1	0.07843	$42.9 \pm 0.6^*$
SRGA J072823.5–440823	Sy1	0.08171	$43.8 \pm 0.3^*$
Выборка №3			
SRGAJ001439.6+183503	Sy2	0.01800 ± 0.00007	$42.5^{+0.3}_{-0.2}$
SRGAJ002240.8+804348	Sy1	0.11470 ± 0.00130	$43.87^{+0.07}_{-0.06}$
SRGAJ010742.9+574419	Sy1.9	0.06992 ± 0.00030	$43.03^{+0.12}_{-0.18}$
SRGAJ021227.3+520953	Sy1	0.23810 ± 0.00011	$44.04^{+0.08}_{-0.10}$
SRGAJ025208.4+482955	Sy1.9	0.03366 ± 0.00008	$42.62^{+0.12}_{-0.12}$
SRGAJ045432.1+524003	Sy1.9	0.03117 ± 0.00012	$43.10^{+0.08}_{-0.09}$
SRGAJ051313.5+662747	Sy2	0.01479 ± 0.00008	$42.05^{+0.12}_{-0.13}$
SRGAJ110945.8+800815	Sy2	0.18879 ± 0.00031	$44.21^{+0.18}_{-0.20}$
SRGAJ161251.4–052100	Sy2	0.03055	$42.61^{+0.12}_{-0.13}$
SRGAJ161943.7–132609	Sy1.9	0.07891	$43.60^{+0.14}_{-0.16}$
SRGAJ182109.8+765819	Sy2	0.06310 ± 0.00040	$43.16^{+0.10}_{-0.13}$
SRGAJ193707.6+660816	NLSy1	0.07136 ± 0.00012	$42.96^{+0.05}_{-0.04}$
SRGAJ200331.2+701332	Sy1	0.09759 ± 0.00002	$43.41^{+0.06}_{-0.06}$

Продолжение таблицы 1.4

Объект	Оптический тип	z^1	$\log L_X^2$
SRGAJ211149.5+722815	Sy2	0.10611 ± 0.00011	$43.46^{+0.11}_{-0.10}$
Выборка №4			
SRGAJ000132.9+240237	Sy1.9	0.10478 ± 0.00006	$43.7^{+0.4}_{-0.7}$
SRGAJ001059.5+424341	Sy1	0.14640 ± 0.00009	$43.49^{+0.11}_{-0.18}$
SRGAJ023800.1+193818	Sy1	0.03350 ± 0.00014	$42.10^{+0.10}_{-0.14}$
SRGAJ025900.3+502958	Sy1	0.09461 ± 0.00013	$43.31^{+0.19}_{-0.18}$
SRGAJ040335.6+472440	Sy1	0.0967 ± 0.0003	$43.58^{+0.16}_{-0.20}$
SRGAJ165143.2+532539	Sy1.9	0.02864 ± 0.00004	$42.0^{+0.2}_{-0.2}$
SRGAJ181749.5+234311	Sy1.9	0.08134 ± 0.00014	$43.7^{+0.2}_{-0.2}$
SRGAJ191628.1+711619	Sy1	0.09839 ± 0.00017	$43.30^{+0.07}_{-0.07}$
SRGAJ194412.5-243619	Sy2	0.14021 ± 0.00010	$44.45^{+0.08}_{-0.18}$
SRGAJ195226.6+380011	Sy1	0.07666 ± 0.00007	$43.11^{+0.12}_{-0.18}$
SRGAJ201633.2+705525	Sy1	0.25791 ± 0.00005	$43.91^{+0.15}_{-0.17}$

¹ Красные смещения без указанных погрешностей взяты из каталога 6dFGS.

² Светимость степенного рентгеновского континуума в наблюдаемом диапазоне 4–12 кэВ, исправленная за галактическое и внутреннее поглощение, рассчитанная по лучшей модели: PL+АРЕС или PL+ВВ при наличии мягкого избытка, либо PL в остальных случаях (см. табл. 1.3). Ошибка соответствует 90% доверительному интервалу, без учета погрешности z .

* Для источников, расположенных на западной галактической половине неба (на которой за обработку данных телескопа *eROSITA* отвечает германский консорциум) приведены светимости в наблюдаемом диапазоне 4–12 кэВ без поправки за поглощение, которые были оценены на основе потоков источников, приведенных в каталогах обзора всего неба *ART-XC*, соответствующих указанным выборкам.

1.5.4 Оценка масс черных дыр и темпов аккреции

Даже однократное измерение характеристик присутствующих в оптическом спектре АЯГ первого типа широких эмиссионных линий, которые предположительно рождаются в окрестности центральной черной дыры, позволяет оценить массу последней на основе известных эмпирических соотношений.

Последние основаны на вириальной теореме и откалиброваны по наблюдениям (гораздо более затратным) отдельных АЯГ методом эхокартирования. Мы оценили массы центральных чёрных дыр в объектах типа Sy1 и NLSy1 из нашей выборки по светимости и ширине широкой компоненты линии $H\alpha$. В единственном случае, когда $H\alpha$ выпала за пределы спектрального диапазона (SRGA J201633.2+705525), использовалась аналогичная оценка по $H\beta$. Из рассмотрения были исключены три Sy1, для которых доступны только спектры из обзора 6dF, поскольку они не откалиброваны по потоку и не позволяют измерить светимости линий.

В наших публикациях [25;28–30] оценки масс черных дыр были выполнены не для всех сейфертов первого типа, поэтому мы добавили ниже недостающие оценки. Кроме того, в статье [25] масса черной дыры в SRGA J224125.9+760343 оценивалась на основе линии $H\beta$, хотя в спектре есть также широкая линия $H\alpha$, поэтому ниже мы использовали именно эту (более сильную) линию для оценки. Наконец, в наших статьях при определении светимости широких линий $H\alpha$ и $H\beta$ предполагалось, что они не подвержены внутреннему поглощению. Тем не менее, как известно из литературы, даже АЯГ первого типа может присутствовать заметное количество пыли на луче зрения. Поэтому ниже мы решили учесть поправку за внутреннее поглощение с помощью бальмеровского декремента широких линий ($H\alpha/H\beta$), предполагая стандартный коэффициент покраснения $R_V = 3.1$ и кривую экстинкции из работы [63]: $A_V = 7.202 [\log(H\alpha/H\beta) - \log 3.06]$. Здесь 3.06 – характерный бальмеровский декремент для АЯГ с низким внутренним поглощением (“голубыми” спектрами) из работы [64]. Тогда поглощение в линиях: $A(H\alpha) = 0.817 A_V$ и $A(H\beta) = 1.165 A_V$. Оценки бальмеровского декремента представлены в табл. 1.5. Присутствие среди них нескольких значений $H\alpha/H\beta \approx 2$ невозможно объяснить в рамках стандартной теории рекомбинации, и, очевидно, отражают систематическую погрешность нашего моделирования спектров (разделения широких и узких компонент линий). Поэтому мы применили поправку за поглощение только к семи объектам с $H\alpha/H\beta > 4.0$.

Оценка масс черных дыр производилась с помощью эмпирической зависимости для широкой $H\alpha$ (формула 6 в статье [65]):

$$M_{\text{BH}} = (2.0_{-0.3}^{+0.4}) \times 10^6 \left(\frac{L_{H\alpha}}{10^{42} \text{ эрг с}^{-1}} \right)^{0.55 \pm 0.02} \left(\frac{FWHM_{H\alpha}}{10^3 \text{ км с}^{-1}} \right)^{2.06 \pm 0.06} M_{\odot} \quad (1.6)$$

Таблица 1.5 — Массы, болометрические светимости и эддингтоновские отношения для центральных черных дыр в галактиках типа Sy1

Источник <i>ART-XC</i>	$\left(\frac{F(H\alpha)}{F(H\beta)}\right)_{\text{obs}}$	Масса ЧД, $10^8 M_{\odot}$	$L_{\text{bol}}, 10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$	λ_{Edd}
Выборка №1				
SRGAJ043209.6+354917	3.5 ± 0.8	1.1 ± 0.2	10^{+3}_{-3}	$0.06^{+0.02}_{-0.02}$
SRGAJ224125.9+760343	3.13 ± 0.08	0.33 ± 0.07	124^{+39}_{-71}	$2.6^{+1.0}_{-1.6}$
Выборка №2				
SRGAJ062627.2+072734	4.3 ± 0.3	0.81 ± 0.18	$1.5^{+2.5}_{-0.9}$	$0.013^{+0.021}_{-0.008}$
SRGAJ092021.6+860249	2.3 ± 0.4	0.042 ± 0.009	$1.17^{+0.14}_{-0.15}$	$0.19^{+0.05}_{-0.05}$
SRGAJ195702.4+615036	6.6 ± 1.1	0.9 ± 0.3	$2.7^{+0.3}_{-0.3}$	$0.022^{+0.008}_{-0.008}$
SRGAJ223714.9+402939	2.1 ± 0.2	3.5 ± 0.9	$4.7^{+1.0}_{-0.9}$	$0.009^{+0.003}_{-0.003}$
SRGAJ235250.6-170449	5.3 ± 0.2	7.2 ± 1.7	$5.3^{+1.1}_{-1.0}$	$0.0050^{+0.0016}_{-0.0015}$
Выборка №3				
SRGAJ002240.8+804348	3.62 ± 0.18	2.6 ± 0.6	$11.6^{+1.2}_{-1.0}$	$0.030^{+0.007}_{-0.007}$
SRGAJ021227.3+520953	6.8 ± 0.4	3.8 ± 0.9	18^{+2}_{-2}	$0.032^{+0.008}_{-0.008}$
SRGAJ193707.6+660816	3.91 ± 0.19	0.12 ± 0.02	$1.70^{+0.11}_{-0.10}$	$0.099^{+0.020}_{-0.019}$
SRGAJ200331.2+701332	3.5 ± 0.4	2.3 ± 0.5	$4.1^{+0.4}_{-0.3}$	$0.013^{+0.003}_{-0.003}$
Выборка №4				
SRGAJ001059.5+424341	4.6 ± 0.2	2.5 ± 0.6	$5.5^{+0.9}_{-1.2}$	$0.015^{+0.004}_{-0.005}$
SRGAJ023800.1+193818	3.4 ± 0.5	0.047 ± 0.010	$0.23^{+0.04}_{-0.04}$	$0.034^{+0.009}_{-0.009}$
SRGAJ025900.3+502958	4.4 ± 0.3	1.1 ± 0.2	$3.6^{+1.1}_{-0.8}$	$0.022^{+0.008}_{-0.007}$
SRGAJ040335.6+472440	2.2 ± 0.2	0.28 ± 0.06	$5.8^{+1.4}_{-1.5}$	$0.14^{+0.05}_{-0.05}$
SRGAJ191628.1+711619	4.0 ± 0.3	1.0 ± 0.2	$3.3^{+0.3}_{-0.3}$	$0.022^{+0.005}_{-0.005}$
SRGAJ195226.6+380011	6.9 ± 0.5	0.44 ± 0.10	$2.3^{+0.4}_{-0.5}$	$0.036^{+0.010}_{-0.011}$
SRGAJ201633.2+705525*	—	1.35 ± 0.19	13^{+3}_{-3}	$0.064^{+0.018}_{-0.016}$

Доверительные интервалы представлены на уровне 68%.

* Для данного источника оценка масса черной дыры оценивалась по линии $H\beta$, для всех остальных — по линии $H\alpha$.

или аналогичной зависимости для широкой $H\beta$ (формула 7 в статье [65]) :

$$M_{\text{BH}} = (3.6 \pm 0.2) \times 10^6 \left(\frac{L_{H\beta}}{10^{42} \text{ эрг с}^{-1}} \right)^{0.55 \pm 0.02} \left(\frac{FWHM_{H\beta}}{10^3 \text{ км с}^{-1}} \right)^2 M_{\odot}. \quad (1.7)$$

Полученные оценки масс черных дыр приведены в табл. 1.5.

Зная M_{BH} и болометрическую светимость, L_{bol} , можно оценить отношение темпа аккреции вещества на черную дыру к критическому (при котором достигается эддингтоновская светимость), λ_{Edd} . Для эддингтоновской светимости можно принять $L_{\text{Edd}} \approx 1.5 \times 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ эрг с}^{-1}$ (с учетом гелия).

Достаточно хорошим индикатором болометрической светимости АЯГ может служить исправленная за поглощение рентгеновская светимость. Мы оценили болометрические светимости АЯГ первого типа в нашей выборке, используя болометрическую поправку для диапазона 2–10 кэВ из работы [66]: $L_{\text{bol}}/L_X \sim 11$. Светимости в 2–10 кэВ в системе покоя источников были получены пересчетом светимостей в наблюдаемом диапазоне 4–12 кэВ из таблицы 1.4, предполагая степенной спектр с наклоном Γ , соответствующим модели наилучшей аппроксимации для данного источника (табл. 1.3). Полученные значения L_{bol} и λ_{Edd} представлены в табл. 1.5.

На основе полученных значений из таблицы 1.5 была построена диаграмма масса черной дыры – эддингтоновское отношение (рис. 1.5). Измеренные массы оказались в диапазоне от $\sim 5 \times 10^6$ до $\sim 7 \times 10^8 M_{\odot}$, а значения λ_{Edd} у большинства объектов варьируются от $\sim 0.5\%$ до $\sim 20\%$, что характерно для сейфертовских галактик в целом (см., например, [67;68]). Исключением является NLSy1 SRGA J224125.9+760343, у которого $L_{\text{bol}} \sim L_{\text{Edd}}$. Это соответствует популярной точке зрения, что в сейфертовских галактиках первого типа с узкими линиями аккреция происходит в темпе, близком к критическому [69]. Однако в случае другого NLSy1 SRGA J193707.6+660816 $\lambda_{\text{Edd}} \sim 0.1$. Правда, необходимо отметить, что судя по ширине бальмеровских линий ($\text{FWHM} \approx 2200\text{--}2400 \text{ км с}^{-1}$) последний является пограничным объектом между классами NLSy1 и Sy1. Наконец, нельзя забывать, что во всех этих оценках должна присутствовать значительная систематическая погрешность (наряду с приведенными в таблице статистическими ошибками), связанная с оценкой масс черных дыр по эмпирическим соотношениям и применением болометрической поправки.

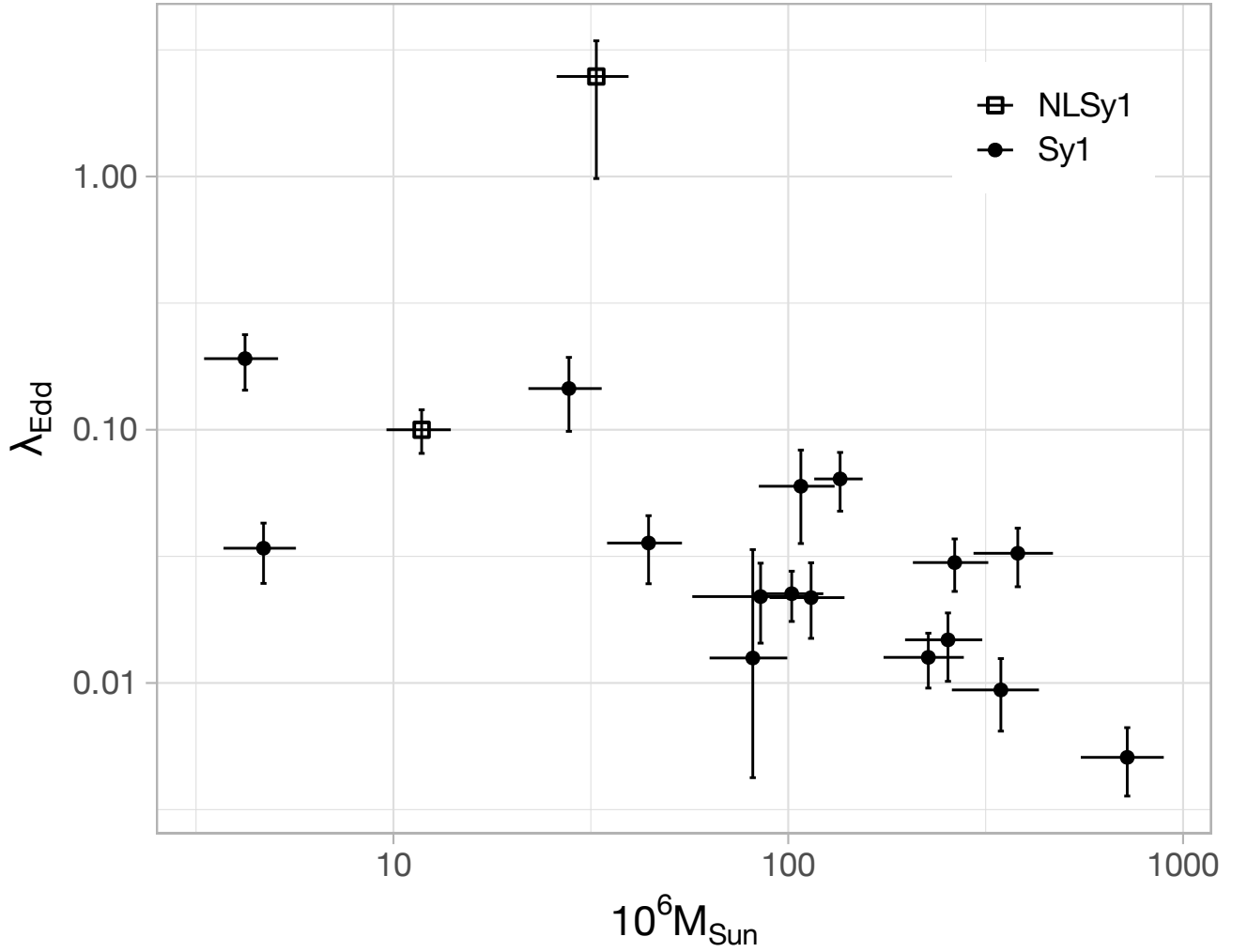


Рисунок 1.5 — Диаграмма масса черной дыры – эддингтоновское отношение (см. табл. 1.5) для АЯГ первого типа (Sy1 и NLSy1).

1.5.5 Наклон рентгеновского континуума и внутреннее поглощение

На основе полученных рентгеновских спектральных параметров (табл. 1.3) мы построили зависимость наклона степенной компоненты Γ от колонки внутреннего поглощения N_{H} (рис. 1.6). На рис. 1.6 изображены 39 источников. Напомним, что для ряда объектов обнаружен мягкий избыток на энергиях ниже ~ 1 кэВ. В этих случаях значения Γ и N_{H} на диаграмме соответствует параметрам двухкомпонентной модели PL + АРЕС или PL + ВВ (в зависимости от конкретного объекта).

Как видно из рисунка, распределение наклонов в целом сосредоточено вблизи типичного для АЯГ значения $\Gamma \approx 1.8$, что согласуется, например, с [70]. На диаграмме выделяется сейфертовская галактика первого типа с узкими

линиями SRGA J193707.6+660816, для которой получился существенно более крутой наклон спектра: $\Gamma = 2.33 \pm 0.10$. Однако такие наклоны характерны для NLSy1 в целом [71; 72].

Распределение источников по N_{H} (рис. 1.6) демонстрирует согласие с оптическим типом. А именно, большинство объектов Sy1.9/Sy2 характеризуются значительным внутренним поглощением: $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Среди них выделяются два источника – SRGA J232446.8+440756 (Sy2) и SRGA J000132.9+240237 (Sy1.9), которые могут быть комптоновски толстыми АЯГ ($N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ см}^{-2}$). Однако, чтобы надёжно ограничить N_{H} в этих объектах, требуется провести более глубокие широкополосные рентгеновские наблюдения. Наоборот, для всех Sy1/NLSy1 внутреннее поглощение либо не обнаруживается, либо невелико: $N_{\text{H}} < 10^{21.5} \text{ см}^{-2}$.

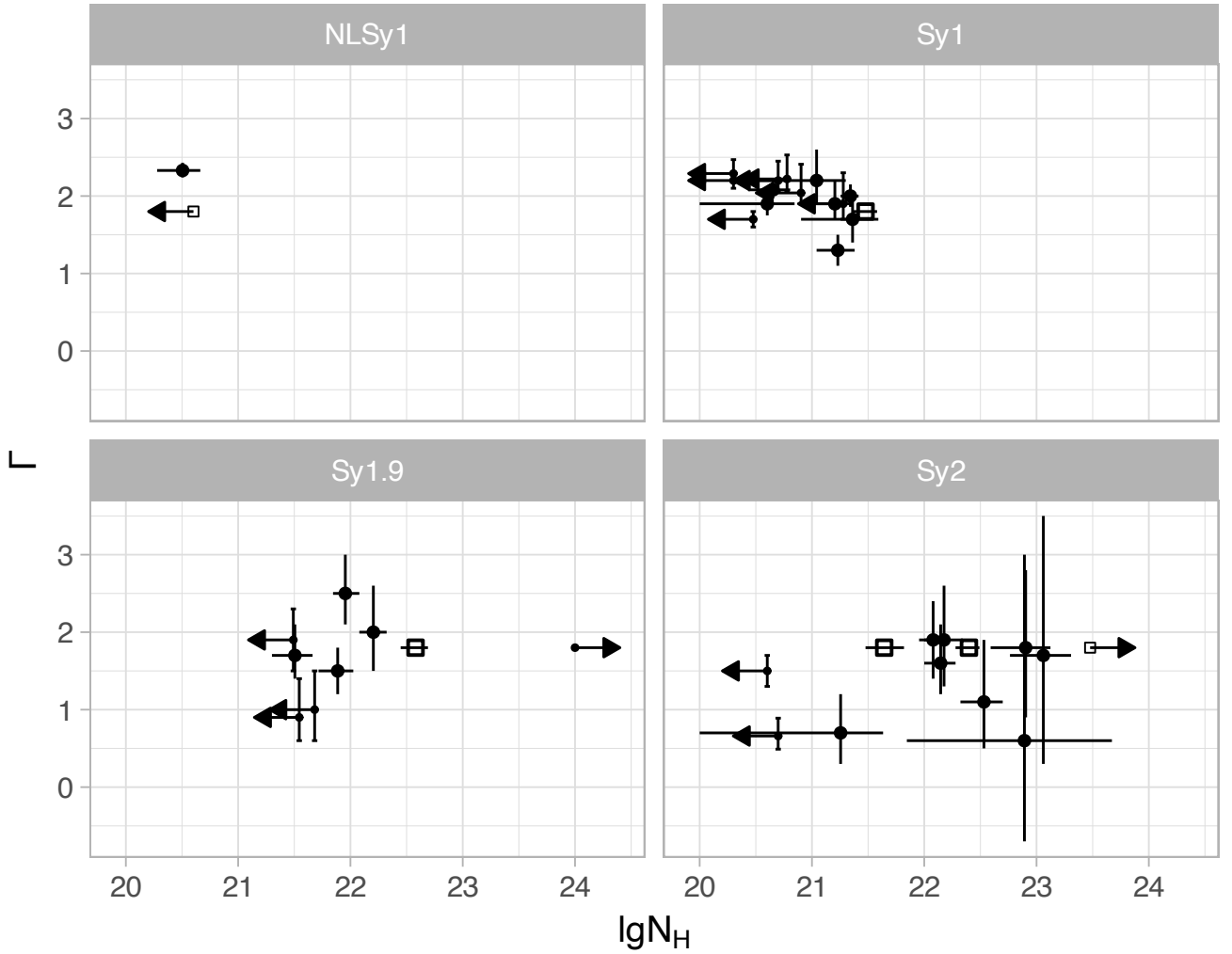


Рисунок 1.6 — Зависимость наклона рентгеновского степенного континуума от колонки внутреннего поглощения для наилучшей модели рентгеновского спектра (см. табл. 1.3). Диаграмма нарисована отдельно для четырех типов сейфертовских галактик. Источники из выборки №1, для которых наклон фиксировался на значении $\Gamma = 1.8$, отмечены полыми квадратами. Ошибки и верхние пределы соответствуют 90% доверительным интервалам. Для источника SRGA J000132.9+240237 (Sy1.9), рентгеновский спектр которого согласуется в моделью отраженного излучения, показан вероятный предел $N_H > 10^{24} \text{ см}^{-2}$ в предположении, что $\Gamma = 1.8$.

1.5.6 Многоволновые свойства объектов

Таблица 1.6 — Многоволновые свойства активных ядер галактик

Источник <i>ART-XC</i>	Компаньон	$W1 - W2$	Радио, мЯн
Выборка №1			
SRGA J043209.6+354917	2MASX J04320796+3549287	0.68 ± 0.03	2.5 ± 0.4 (2–4 ГГц)
	WISEA J043207.95+354928.8		
	VLASS1QLCIR J043207.89+354929.0		
SRGA J045049.8+301449	LEDA 1896296	0.38 ± 0.03	3.1 ± 0.3 (2–4 ГГц)
	WISEA J045048.00+301502.8		
	VLASS1QLCIR J045047.99+301503.0		
SRGA J152102.3+320418	WISEA J152101.83+320414.6	1.20 ± 0.03	1.3 ± 0.3 (2–4 ГГц)
	VLASS1QLCIR J152101.85+320414.4		
SRGA J200431.6+610211	2MASX J20043237+6102311	0.89 ± 0.03	
	WISEA J200432.40+610230.8		
SRGA J224125.9+760343	WISEA J224125.79+760353.8	0.96 ± 0.04	
SRGA J232446.8+440756	2MASX J23244834+4407564	0.84 ± 0.03	2.5 ± 0.3 (2–4 ГГц)
	WISEA J232448.36+440756.5		
	VLASS1QLCIR J232448.35+440756.6		
Выборка №2			
SRGA J025234.3+431004	LEDA 90641	0.77 ± 0.03	2.8 ± 0.3 (2–4 ГГц)
	VLASS1QLCIR J025233.99+431003.0		
SRGA J062627.2+072734	LEDA 136513	0.85 ± 0.03	
SRGA J070636.4+635109	UGC 3660,	0.23 ± 0.03	1.0 ± 0.3 (2–4 ГГц)
	VLASS1QLCIR J025233.99+431003.		
SRGA J092021.6+860249	LEDA 2790304,	0.64 ± 0.03	4.9 ± 0.2 (2–4 ГГц)
	VLASS1QLCIR J091954.62+860304.0		
SRGA J195702.4+615036	LEDA 2625686	0.65 ± 0.03	
SRGA J221913.2+362014	WISEA J221914.50+362010.5	1.20 ± 0.03	1.4 ± 0.2 (2–4 ГГц)
	VLASS1QLCIR J221914.46+362010.4		
SRGA J223714.9+402939	LEDA 5060459	0.73 ± 0.03	3.4 ± 0.5 (1.4 ГГц)
	NVSS 223716+402936		
SRGA J232037.8+482329	LEDA 2316409,	0.32 ± 0.03	4.0 ± 0.3 (2–4 ГГц)
	VLASS1QLCIR J232039.34+482326.3		
SRGA J235250.6–170449	2MASS J23525142-1704372	0.54 ± 0.03	3.0 ± 0.7 (850 МГц)
	RACS-DR1 J235251.3-170435		

Продолжение таблицы 1.6

Источник <i>ART-XC</i>	Компаньон ¹	$W1 - W2^2$	Радио ³ , мЯн
SRGA J030838.1–552041	LEDA 410289 RACS-DR1 J030838.3-552037	0.45 ± 0.04	4.5 ± 0.4 (850 МГц)
SRGA J052959.8–340157	LEDA 668116 VLASS1QLCIR J052959.21-340157.4	0.53 ± 0.03	11.7 ± 0.4 (2–4 ГГц)
SRGA J055053.7–621457	LEDA 178653 RACS-DR1 J055053.2-621454	0.76 ± 0.03	1.7 ± 0.5 (850 МГц)
SRGA J060241.1–595152	LEDA 178859 RACS-DR1 J060240.7-595153	0.68 ± 0.03	3.8 ± 0.8 (850 МГц)
SRGA J061322.9–290027	LEDA 734640 VLASS1QLCIR J061324.28-290023.1	0.68 ± 0.03	8.5 ± 0.3 (2–4 ГГц)
SRGA J063324.9–561424	LEDA 148903 RACS-DR1 J063326.5-561420	0.96 ± 0.04	16.1 ± 0.4
SRGA J064421.5–662620	2MASS J06442187-6626199 RACS-DR1 J064421.8-662620	0.84 ± 0.03	2.8 ± 0.5
SRGA J072823.5–440823	2MASS J07282338-4408241 RACS-DR1 J072823.7-440827	0.88 ± 0.03	3.5 ± 0.5
Выборка №3			
SRGA J001439.6+183503	NGC 52, VLASS1QLCIR J001440.13+183456.0	0.26 ± 0.03	3.8 ± 0.4 (2–4 ГГц)
SRGA J002240.8+804348	WISEA J002243.69+804346.1	0.61 ± 0.03	
SRGA J010742.9+574419	WISEA J010743.11+574417.7	0.79 ± 0.03	
SRGA J021227.3+520953	2MASS J02122646+5209533	0.89 ± 0.03	
SRGA J025208.4+482955	WISEA J025209.64+482959.4	0.71 ± 0.03	
SRGA J045432.1+524003	LEDA 16297, VLASS1QLCIR J045431.78+524006.4	0.39 ± 0.03	4.2 ± 0.3 (2–4 ГГц)
SRGA J051313.5+662747	2MASX J05131637+6627498, VLASS1QLCIR J051316.35+662750.2	0.50 ± 0.03	1.6 ± 0.3 (2–4 ГГц)
SRGA J110945.8+800815	WISEA J110943.77+800805.6, VLASS1QLCIR J110944.18+800804.9	0.76 ± 0.04	10.8 ± 0.5 (2–4 ГГц)
SRGA J161251.4–052100	LEDA 3097794	0.78 ± 0.03	
SRGA J161943.7–132609	2MASX J16194407-1326166 RACS-DR1 J161943.9-132610	0.81 ± 0.03	5.3 ± 1.3
SRGA J182109.8+765819	LEDA 2772547, VLASS1QLCIR J182111.52+765816.6	0.91 ± 0.03	1.1 ± 0.3 (2–4 ГГц)
SRGA J193707.6+660816	2MASS J19370820+6608213, NVSS J193710+660830	0.64 ± 0.03	15.0 ± 1.0 (1.4 ГГц)

Продолжение таблицы 1.6

Источник <i>ART-XC</i>	Компаньон ¹	$W1 - W2^2$	Радио ³ , мЯн
SRGA J200331.2+701332	2MASS J20033397+7013369	0.89 ± 0.03	
SRGA J211149.5+722815	WISEA J211151.78+722816.4, VLASS1QLCIR J211151.87+722816.4	1.08 ± 0.03	2.4 ± 0.3 (2–4 ГГц)
Выборка №4			
SRGA J000132.9+240237	2MASX J00013232+2402304, VLASS1QLCIR J000132.25+240231.4	0.86 ± 0.03	224 ± 3 (2–4 ГГц)
SRGA J001059.5+424341	WISEA J001059.72+424352.8	0.71 ± 0.05	
SRGA J023800.1+193818	2MASS J02375999+1938118	0.11 ± 0.03	
SRGA J025900.3+502958	LEDA 2374943, VLASS1QLCIR J025900.99+503014.6	0.79 ± 0.03	1.6 ± 0.3 (2–4 ГГц)
SRGA J040335.6+472440	2MASS J04033641+4724383	0.94 ± 0.03	
SRGA J165143.2+532539	SBS 1650+535, VLASS1QLCIR J165143.74+532539.7	0.75 ± 0.03	2.9 ± 0.4 (2–4 ГГц)
SRGA J181749.5+234311	LEDA 1692433, VLASS1QLCIR J181748.99+234312.8	0.65 ± 0.03	5.7 ± 0.4 (2–4 ГГц)
SRGA J191628.1+711619	WISEA J191629.25+711616.4	0.59 ± 0.03	
SRGA J194412.5–243619	2MASX J19441243-2436217, VLASS1QLCIR J194412.41-243620.8	1.06 ± 0.03	3.0 ± 0.3 (1.4 ГГц)
SRGA J195226.6+380011	2MASS J19522509+3800269	0.88 ± 0.03	
SRGA J201633.2+705525	WISEA J201632.61+705527.2 VLASS1QLCIR J201627.08+705531.8	1.04 ± 0.03	1.3 ± 0.4 (2–4 ГГц)

¹ Оптический/ИК/радио компаньон. ² ИК цвет. ³ Спектральная плотность потока излучения в диапазоне частот, который приведен в скобках, при детектировании в одном из обзоров VLASS, NVSS, RACS.

В табл. 1.6 собрана краткая информация о свойствах исследуемых объектов в оптическом, ИК и радио диапазонах, а именно: название (включающее координаты) компаньона рентгеновского источника по базе данных Vizier⁶, цвет в среднем инфракрасном диапазоне $W1 - W2$ по данным каталога ALLWISE [73] космической обсерватории WISE [74] и плотность потока радиоизлучения по данным обзоров VLASS [75], NVSS [76] и RACS [77]. Обзор VLASS проводится в полосе 2–4 ГГц, NVSS проводился на частоте 1.4 ГГц, а RACS проводится на

⁶<https://vizier.cds.unistra.fr/>

частоте 887.5 МГц. Обзоры VLASS и NVSS покрывают небо на $\delta > -40^\circ$, а обзор RACS – небо на $-80^\circ \leq \delta \leq +30^\circ$. Таким образом все исследованные нами источники попадают в область покрытия хотя бы одного из этих радиообзоров.

Приведенный в табл. 1.6 перечень радиокомпаньонов несколько отличается от того, что приводилось в наших публикациях по выборкам №№1–4: там для части источников были указаны потоки по NVSS, для других – по VLASS, и не использовались данные «южных» радиообзоров. Здесь же, для большей однородности информации, мы, по возможности, используем данные обзора VLASS, а для южных объектов приводим информацию из обзора – RACS. При этом есть несколько особых случаев. Источник SRGA J223714.9+402939 не детектируется в VLASS, но зарегистрирован в обзоре NVSS; 2) источник SRGA J193707.6+660816 присутствует в каталоге VLASS, но для него отсутствуют значения спектральной плотности потока. Поэтому для этих двух объектов в таблице 1.6 приведены данные из обзора NVSS. Два объекта со склонением $\delta > -40^\circ$ (SRGA J235250.6-170449 и SRGA J161943.7-132609) не детектируются ни в VLASS, ни в NVSS, но регистрируются в RACS. Мы не пытались оценить верхние пределы на спектральную плотность потока для источников, которых нет ни в одном из перечисленных каталогов, так как эта величина нетривиальным образом зависит от положения на небе и эпохи наблюдения.

Одним из стандартных критериев отбора кандидатов в АЯГ является цвет в среднем ИК диапазоне $W1 - W2$. Он вычислялся из фотометрии в полосах $W1$ ($3.4\mu\text{м}$) и $W2$ ($4.6\mu\text{м}$) в фотометрической системе Веги. Надёжным порогом для АЯГ высокой светимости, т.е. достаточно мощных сейфертовских галактик и квазаров, считается $W1 - W2 > 0.5 \div 0.8$ [78]. Такие инфракрасные цвета объясняются тем, что значительная часть оптического и ультрафиолетового излучения аккреционного диска, а также мягкого рентгеновского излучения из горячей короны диска перехватывается и переизлучается горячей ($T \lesssim 1500$ К) пылью в окружающем газопылевом «торе». Однако АЯГ относительно низкой светимости могут иметь более «синий» цвет (в основном из-за вклада излучения родительской галактики) и не удовлетворять этому критерию.

У большинства исследованных нами объектов $W1 - W2 > 0.5$, но в шести случаях это не так. Из представленной на рис. 1.7 диаграммы видна положительная связь между рентгеновской светимостью (являющейся хорошим индикатором болометрической светимости АЯГ) и ИК цветом $W1 - W2$: при росте L_X объекты «краснеют». Вероятно, это связано с тем, что по мере

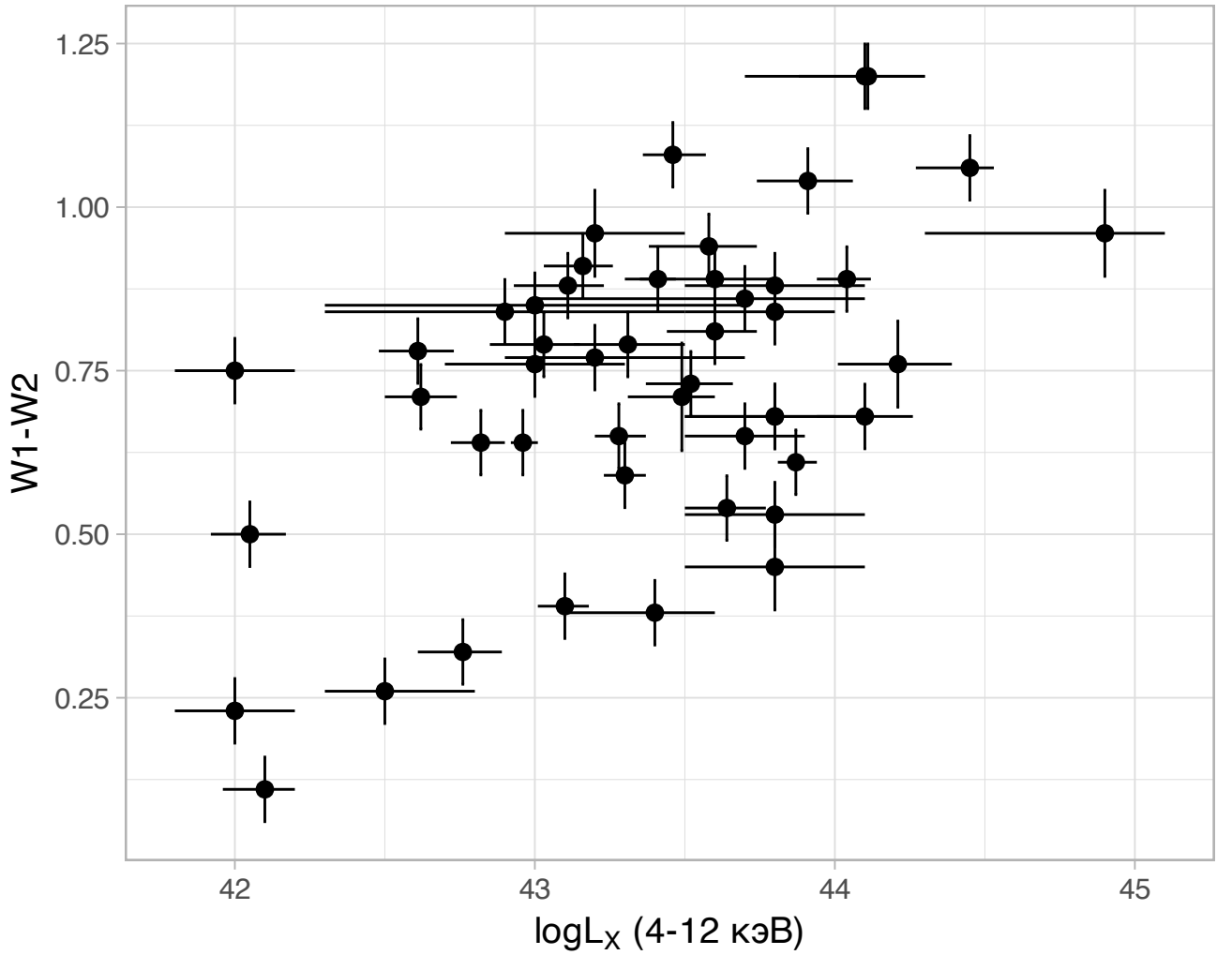


Рисунок 1.7 — Зависимость ИК цвета $W1 - W2$ от рентгеновской светимости. Ошибки соответствуют 90% интервалу.

увеличения светимости АЯГ ИК излучение из «тора» начинает вносить более существенный вклад по сравнению с излучением родительской галактики.

У 32 объектов, т.е. 67% из 48 объектов, расположенных в области покрытия обзоров NVSS, VLASS и RACS, регистрируется радиоизлучение. Особенно ярким в радиодиапазоне ($F_\nu \approx 224$ мЯн на 3 ГГц) является источник SRGA J000132.9+240237. Интересно, что он же, вероятно, является комптоновски-толстым АЯГ, как обсуждалось выше. На рис. 1.8 сравниваются рентгеновские и радио светимости объектов. Чтобы привести значения из табл. 1.6 к общей частоте для сопоставления на диаграмме, мы пересчитали спектральные плотности потоков к 3 ГГц, предполагая степенной спектр излучения $S_\nu \sim \nu^\alpha$ с типичным для АЯГ индексом $\alpha = -0.7$ [79]. Большинство источников, зарегистрированных в радиодиапазоне, имеют значения $L_{\text{radio}}/L_X = 10^{-6} \div 10^{-4}$, где $L_{\text{radio}} \equiv \nu L_\nu$ на 3 ГГц, а L_X — свети-

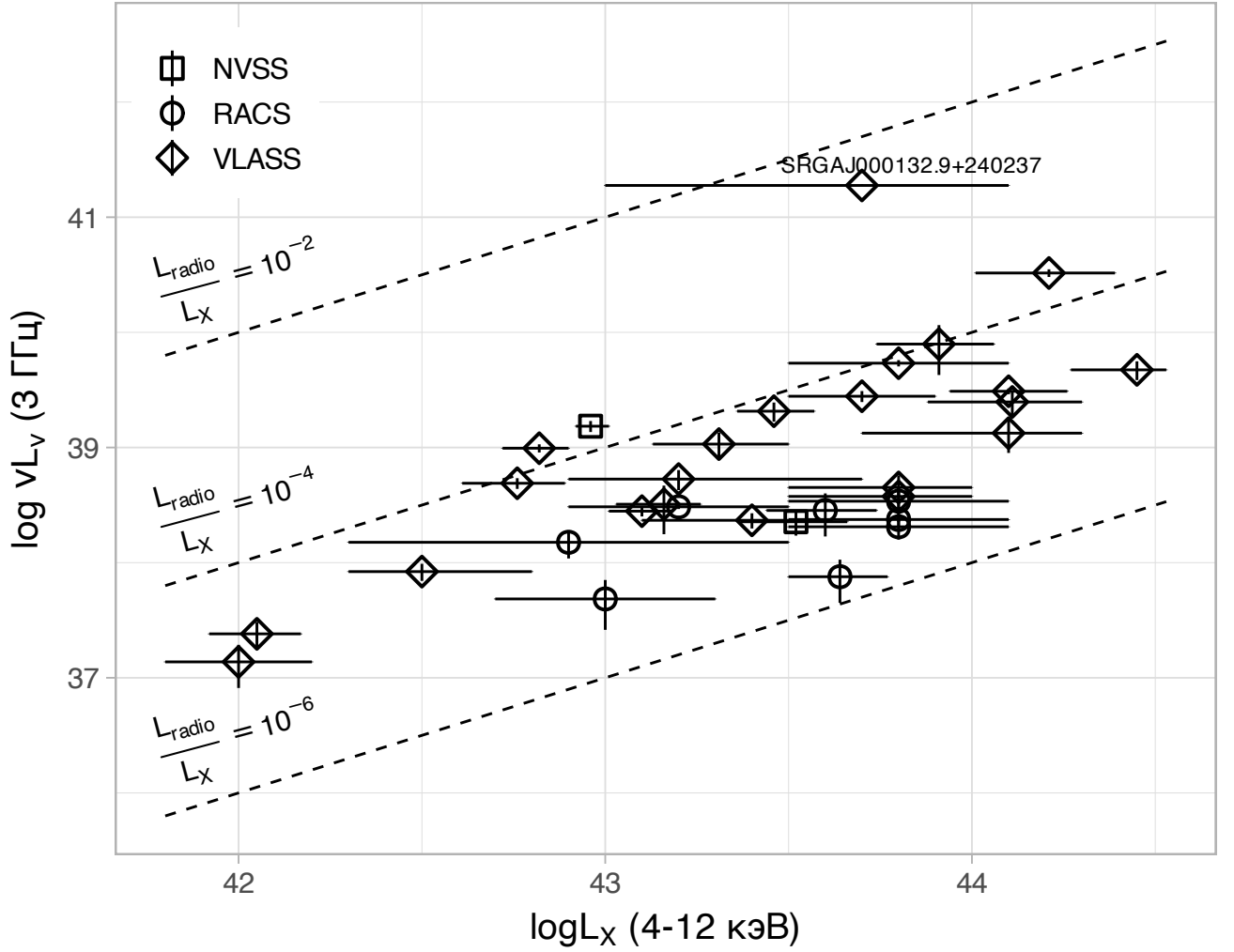


Рисунок 1.8 — Зависимость рентгеновской светимости от светимости в радиодиапазоне. Ошибки соответствуют 90% интервалу.

мость в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Опять же резко выделяется источник SRGA J000132.9+240237, у которого $L_{\text{radio}}/L_x = 4_{-2}^{+3} \times 10^{-3}$, что позволяет считать его радиогромким АЯГ.

1.6 Заключение

С помощью наблюдений на оптических телескопах 1.5-м класса (АЗТ-ЗЗИК, РТТ-150) и анализа архивных данных обзоров 6dF и SDSS нам удалось отождествить 48 активных ядер галактик, зарегистрированных в рентгеновском диапазоне энергий 4–12 кэВ телескопом *ART-XC* им. М.Н. Павлинского на борту обсерватории *CPI* в ходе обзора всего неба в 2019–2022 гг.

Из этой выборки 15 раньше не были известны как рентгеновские источники, а остальные 33 объекта хотя и были известны из предыдущих рентгеновских наблюдений других космических обсерваторий, но их природа оставалась неизвестной или плохо изученной. Все исследованные объекты оказались сравнительно близкими сейфертовскими галактиками в диапазоне красных смещений $z = 0.014\text{--}0.283$ и следующим распределением по типам: 19 Sy1, 17 Sy2, 10 Sy1.9 и 2 NLSy1.

Большинство (42) источников из исследованной выборки входят в официальный каталог источников, задетектированных в ходе четырех полных и 40% пятого обзоров всего неба телескопа *ART-XC* (ARTSS1-5). Этот каталог состоит из 1545 источников, и на момент публикации [21] примерно 95% объектов в каталоге (1463) уже были отождествлены и классифицированы, хотя бы предварительно. Причем среди классифицированных объектов большинство (911) являются активными ядрами галактик. Такая высокая полнота (по сравнению с некоторыми другими каталогами рентгеновских источников) была достигнута в том числе благодаря нашей работе по оптическому отождествлению источников из обзора всего неба *ART-XC*, результаты которых были изложены в этой главе диссертации. В этой связи важно отметить, что мы продолжаем проводить оптические наблюдения и обрабатывать получаемые данные с целью достижения 100% полноты отождествления и классификации источников в каталоге ARTSS1-5, и эта работа станет еще более масштабной после того, как будет создан (ориентировочно в 2026 году) новый каталог источников (ожидается ~ 3000 объектов), зарегистрированных в ходе восьми обзоров всего неба *CPG/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.

Работа по отождествлению рентгеновских источников из каталога *ART-XC* ведется с целью составления на его основе статистически полной базы многоволновых данных, которую затем можно будет использовать для исследования популяционных свойств АЯГ и других классов объектов. В этом контексте не менее важна и работа по исследованию рентгеновских спектров АЯГ из каталога *ART-XC*. В данной работе мы проанализировали рентгеновские спектры 39 АЯГ по данным телескопа *eROSITA* в диапазоне энергий 0.2–8.0 кэВ, полученные на восточной галактической половине неба в ходе обзора всего неба обсерватории *CPG*, т.е. примерно в то же время, когда эти

источники были обнаружены телескопом *ART-XC*. Для ряда объектов спектральный анализ проводился совместно по данным *eROSITA* и *ART-XC*, что позволило расширить диапазон энергий до 20 кэВ. Рентгеновские спектры характеризовались наклоном континуума, колонкой внутреннего поглощения и потоком, исправленным за поглощение.

Рентгеновские светимости исследованных объектов находятся в диапазоне от $\sim 10^{42}$ до $\sim 10^{45}$ эрг с^{-1} (4–12 кэВ). Такие значения являются характерными для АЯГ на $z \lesssim 0.3$ (см., например, [80; 81]). Измеренные спектральные наклоны для большинства объектов оказались вблизи “канонического” для АЯГ (исключая блазары) значения $\Gamma = 1.8$, как и, например, для большой выборке АЯГ из жесткого рентгеновского обзора *Swift*/BAT [82].

Значительное внутреннее поглощение, а именно $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ см}^{-2}$ с учетом погрешности, выявлено у 15 объектов, причем у пяти из них колонка поглощения превышает 10^{23} см^{-2} . Особенно выделяется источник SRGA J000132.9+240237, аппроксимация спектра которого моделью степенного континуума с поглощением дает совершенно нетипичный наклон $\Gamma < 0.5$. Это, вероятно, говорит о том, что мы видим излучение, отраженное от газопылевого тора, а лучевая концентрация вещества через тор в направлении наблюдателя может превышать 10^{24} см^{-2} . Однако имеющихся данных обзора всего неба *CPG* недостаточно для того, что получить надежные ограничения на колонку поглощения в этом объекте, который интересен еще и тем, что является радиогромким. Это делает объект приоритетной мишенью для более длительных глубоких наблюдений. Отметим, что недавно для SRGA J000132.9+240237 было специально проведено продолжительное наблюдение с помощью телескопа *ART-XC*, но полученные рентгеновские данные пока не обработаны. Еще более интересным АЯГ, обнаруженным в ходе обзора всего неба *CPG/ART-XC* и отождествленным нами, является сильно поглощенный радиогромкий квазар SRGA J2306+1556, которому посвящена следующая глава диссертации. Он рассматривается отдельно, так как исследовался нами значительно более подробно, чем другие объекты, и результаты по нему были опубликованы отдельно от результатов для выборок №№1–4.

Для 18 сейфертов первого типа были оценены массы центральных чёрных дыр на основе измеренных характеристик широких бальмеровских линий и соответствующих эмпирических соотношения. Кроме того, по рентгеновской светимости были оценены болометрические светимости этих объектов, что

позволило оценить их темпы аккреции (эддингтоновские отношения). Массы варьируются в пределах от $\sim 5 \times 10^6 M_\odot$ до $\sim 7 \times 10^8 M_\odot$, а λ_{Edd} от $\sim 0.5\%$ до $\sim 20\%$ за исключением NLSy1 SRGA J224125.9+760343, у которого $L_{\text{bol}} \sim L_{\text{Edd}}$. Это соответствует популярной точке зрения, что в сейфертовских галактиках первого типа с узкими линиями аккреция происходит в темпе, близком к критическому [69].

Важно подчеркнуть, что каких-либо выводов касательно всего населения АЯГ в близкой Вселенной на основе представленных в этой главе результатов нельзя, так как изученная выборка составляет лишь малую часть от полной выборки АЯГ в каталоге источников *ART-XC*. Однако по результатам данного исследования можно сделать вывод, что в ходе обзора всего неба *ART-XC* пока удавалось открывать в основном умеренно поглощенные АЯГ ($N_{\text{H}} \sim 10^{22}\text{--}10^{23} \text{ см}^{-2}$), а АЯГ с меньшими и большими колонками поглощения в основном уже были открыты ранее в мягких (главным образом ROSAT) и жестких (INTEGRAL/IBIS и Swift/BAT) рентгеновских обзорах неба соответственно. Однако по мере накопления экспозиции в ходе продолжающегося обзора всего неба *ART-XC* эта картина должна меняться, и в новых каталогах *ART-XC* должно появляться все больше новых АЯГ во всем диапазоне значений N_{H} .

Глава 2. SRGA J2306+1556: мощный рентгеновский, радиогромкий, сильно поглощенный квазар на $z=0.44$, обнаруженный обсерваторией СРГ

Данная глава основана на работе 6 из списка публикаций по теме диссертации.

2.1 Введение

Активные ядра галактик сильно различаются по светимости; самые мощные из них (за исключением блазаров) излучают более 10^{47} эрг с^{-1} по всему электромагнитному спектру. Различные типы внегалактических обзоров показывают, что яркие квазары в прошлом (на $z \gtrsim 1$) встречались значительно чаще, чем в настоящую эпоху (например, [7; 83–85]). Это обычно связывают с сильной эволюцией роста сверхмассивных чёрных дыр: наиболее массивные черные дыры пережили основной эпизод(ы) аккреции в первые несколько миллиардов лет после Большого взрыва (например, [86–88]).

Значительная часть роста СМЧД во Вселенной происходит в поглощённых АЯГ, у которых первичный (ультрафиолетовый) компонент излучения, возникающий в аккреционном диске, скрыт от нас (преимущественно вследствие ориентации) оптически толстым слоем холодного газа и пыли, обычно связываемым с так называемым тором (см. обзор [4]). Тор также поглощает мягкое рентгеновское излучение горячей короны аккреционного диска. В результате поглощённые АЯГ могут проявлять себя лишь в инфракрасном и жёстком рентгеновском диапазонах, а также в относительно слабых узких оптических линиях излучения, что осложняет их обнаружение и изучение. Одним из важнейших и всё ещё открытых вопросов остаётся доля поглощённых АЯГ. Имеются убедительные свидетельства, особенно в относительной близкой (лучше изученной) части Вселенной, что эта доля уменьшается с ростом светимости и эддингтоновского отношения (например, [5–9]).

Из-за крутой функции светимости АЯГ и уменьшения доли поглощённых АЯГ с ростом светимости яркие поглощённые АЯГ являются крайне

редкими объектами и потому обычно обнаруживаются лишь на больших (космологических) расстояниях, что затрудняет их детальное изучение. Поэтому представляет интерес поиск и исследование ближайших из таких поглощённых квазаров, от которых телескопы могут собрать достаточно фотонов для статистических исследований. В данной главе описывается как раз такой редкий случай.

Объектом нашего исследования стал сильно поглощённый квазар SRGA J230631.0+155633 (далее — SRGA J2306+1556), обнаруженный при “слепом” поиске в ходе рентгеновского обзора всего неба, выполненного телескопом *ART-XC* им. М. Н. Павлинского на борту обсерватории *CPT*. Мы отождествили этот яркий (поток $\sim 5 \times 10^{-12}$ эрг с $^{-1}$ см $^{-2}$ в диапазоне энергий 4–12 кэВ) рентгеновский источник с оптическим объектом SDSS J230630.38+155620.4, для которого оказался доступен архивный спектр в шестнадцатом выпуске данных Слоуновского цифрового небесного обзора (SDSS DR16) [89]. По этому спектру объект был идентифицирован нами как квазар 2-го типа [21; 43] на красном смещении 0.4386. Это означает, что его внутренняя рентгеновская светимость превышала 4×10^{45} эрг с $^{-1}$ во время обзора всего неба *CPT/ART-XC*. Практически все известные квазары с такой высокой светимостью находятся на большем удалении от нас. Кроме того, согласно архивным данным SRGA J230631.0+155633 оказался радиогромким. Для подробного изучения этого интересного квазара мы организовали последующие точечные рентгеновские наблюдения с помощью *CPT/ART-XC* и телескопа XRT [90] на борту обсерватории Neil Gehrels *Swift* [91], которые позволили нам обнаружить сильное поглощение в рентгеновском спектре источника.

Ниже мы рассматриваем физические свойства SRGA J2306+1556, используя практически все доступные многоволновые данные. Используется космологическая модель с $H_0 = 70$ км с $^{-1}$ Мпк $^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ и $\Omega_m = 0.3$.

Таблица 2.1 — Список рентгеновских наблюдений SRGA J2306+1556.

Дата	Обсерватория/Телескоп/Режим	Экспозиция, с
2020-06-03	<i>CPG/ART-XC</i> /обзор	23
2020-12-07	<i>CPG/ART-XC</i> /обзор	22
2021-06-08	<i>CPG/ART-XC</i> /обзор	25
2021-12-11	<i>CPG/ART-XC</i> /обзор	24
2023-06-03	<i>CPG/ART-XC</i> /точечное	72900
2023-06-09	<i>Swift</i> /XRT/точечное	2300
2023-12-13	<i>CPG/ART-XC</i> /обзор	26
2024-06-15	<i>CPG/ART-XC</i> /обзор	26
2024-12-17	<i>CPG/ART-XC</i> /обзор	26

2.2 Рентгеновские наблюдения

2.2.1 Открытие и наблюдения во время обзора всего неба *CPG/ART-XC*

Рентгеновский источник был обнаружен в диапазоне энергий 4–12 кэВ телескопом *ART-XC* в первый год обзора всего неба *CPG*, на суммарной карте первых двух полугодовых сканов (ARTSS1-2, [43]). Его существование затем было подтверждено в обновлённом каталоге источников, основанном на данных первых четырёх проходов *ART-XC* (ARTSS1-5, [21])¹. В каталогах ARTSS1-2 и ARTSS1-5 источник обозначен как SRGA J230630.9+155637 и SRGA J230631.0+155633 соответственно. Насколько нам известно, его нет ни в опубликованных каталогах рентгеновских источников других миссий. Статистическая неопределённость положения источника согласно ARTSS1-5 составляет $R_{98} = 23.2''$ (радиус 98%-ной доверительной области), как показано на рис. 2.1.

В октябре 2023 года *ART-XC* возобновил обзор всего неба, и к моменту подготовки нашей статьи [92] SRGA J2306+1556 был просканирован ещё три раза. В табл. 2.1 приведены даты и экспозиции (с поправкой на виньетирование).

¹Напомним, что этот каталог также включает данные пятого сканирования примерно для $\sim 40\%$ неба.

ние) для всех семи сканирований SRGA J2306+1556 в ходе обзора всего неба *CPG/ART-XC*.

2.2.2 Направленные наблюдения *CPG/ART-XC*

Чтобы измерить рентгеновский спектр SRGA J2306+1556, в июне 2023 года были проведены его направленные наблюдения: сначала с помощью *CPG/ART-XC* в жёстком рентгеновском диапазоне, а через шесть дней – с помощью *Swift/XRT* в мягком рентгеновском диапазоне. Подробности этих наблюдений приведены в табл. 2.1.

Во время наблюдения *ART-XC* (ID 12310089001) телескоп был наведён на предполагаемый оптический компаньон SDSS J230630.38+155620.4. Поле зрения телескопа составляет 36 угловых минут в диаметре, что позволяет заодно исследовать окружающую область неба. Во время наблюдения работали все семь модулей телескопа. Из анализа были исключены несколько интервалов плохих данных с суммарной продолжительностью около 300 с.

Используя данные об ориентации от бортовой инерциальной навигационной системы GYRO, мы определили положение рентгеновского источника: RA=23h06m30.4s, DEC=+15°56′17″, с 98% статистической ошибкой $r_{98} = 2''$. Эта доверительная область получена с помощью подгонки к полученному изображению функции рассеяния точечного источника (ФРТИ) телескопа по методу максимального правдоподобия. С учётом текущего качества модели ФРТИ *ART-XC* правдоподобие вычислялось на картах неба с размером пикселя 2″, и 98%-ный доверительный интервал оказался внутри пикселя. Кроме того, необходимо учесть систематическую неопределённость в 7″, обусловленную точностью определения ориентации. Таким образом, суммарную неопределённость положения SRGA J2306+1556 можно оценить в 7.3″.

Мы извлекли спектры источника и фона с использованием стандартного программного пакета *ART-XC*, адаптированного под задачи данного исследования, и актуальных калибровок. Затем построили карты фотонов, экспозиции и виньетирования для отдельных энергетических интервалов. Спектр SRGA J2306+1556 был извлечён из окружности радиусом 90″, центрированной на оптических координатах квазара. Спектр фона оценивался в кольце между

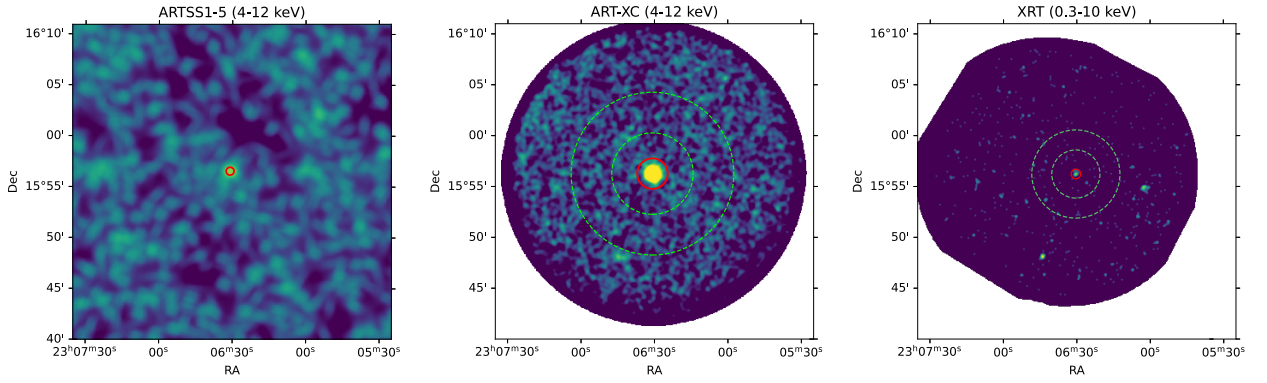


Рисунок 2.1 — Сглаженные рентгеновские изображения SRGA J2306+1556. Левое получено во время обзора всего неба ARTSS1-5 в диапазоне 4–12 кэВ, а среднее и правое — в ходе направленных наблюдений *CPG/ART-XC* и *Swift/XRT* (см. табл. 2.1) в диапазонах 4–12 и 0.3–10 кэВ соответственно. На левом рисунке красная окружность показывает 98% область локализации с радиусом 23.2". На среднем и правом рисунках сплошная красная окружность обозначает область выделения спектра источника с радиусом 90" для *ART-XC* и 28.32" для XRT. Зелёные штриховые кольцевые области представляют области выделения фона: между радиусами 4' и 8' для *ART-XC* и между 142" и 260" для XRT. Область источника для *ART-XC* центрирована на оптическом компаньоне SDSS J230630.38+155620.4, а область XRT — на рентгеновском источнике (эти положения отличаются всего лишь на 6.5").

радиусами 4' и 8' (рис. 2.1). Фон *ART-XC* в основном обусловлен вкладом заряженных частиц; космический (внегалактический) рентгеновский фон вносит лишь $\sim 3\%$ в диапазоне 4–12 кэВ и ещё меньше на более высоких энергиях [21]. Фон от частиц слабо зависит от положения внутри поля зрения *ART-XC*. Используя модельные карты фона, полученные в ходе обзора всего неба в «пустых» полях, мы проверили, что допущение о плоском фоне не оказывает существенного влияния на извлекаемый спектр SRGA J2306+1556. Поэтому далее мы пренебрегаем этим эффектом и используем спектр фона в нашем анализе стандартным образом, учитывая лишь различие в площади областей извлечения фотонов от фона и источника.

На расстоянии 9' от SRGA J2306+1556 *ART-XC* задетектировал ещё один источник (23h06m44s, +15d48m11s) во время направленного наблюдения. Его поток в диапазоне 4–12 кэВ составляет $\sim 2 \times 10^{-13}$ эрг с⁻¹ см⁻², а значение правдоподобия обнаружения равно 41.2 (что позволяет уверенно говорить о реальности источника). Из-за слабого потока и большого удаления от оптической

оси телескопа этот источник не влияет на наши измерения спектров источника и фона для SRGA J2306+1556.

Мы ограничили спектральный анализ диапазоном энергий 4–20 кэВ, поскольку выше 20 кэВ фон доминирует над сигналом источника.

Для изучения возможной быстрой переменности SRGA J2306+1556 во время направленных наблюдения мы использовали несколько энергетических диапазонов между 4 и 16 кэВ. С этой целью отсчёты источника извлекались из области радиусом $1'$, центрированной на SDSS J230630.38+155620.4. При этом фоновые отсчёты не вычитались, поскольку фон *ART-XC* очень стабилен на соответствующих временных масштабах.

2.2.3 Направленные наблюдения *Swift*/XRT

Источник наблюдался обсерваторией *Swift* (наблюдение типа Target of Opportunity, ID 18931). Мы обработали данные *Swift*/XRT (Target ID 00016070) с использованием сервиса Университета Лестера², который использует пакет HEASOFT v6.32³.

Телескоп был наведён на SDSS J230630.38+155620.4. Целевой источник уверенно обнаружен на изображении *Swift*/XRT (см. рис. 2.1) в положении RA=23h06m30.4s, DEC=15°56'14". Стандартная ошибка положения, выдаваемая программным конвейером *Swift* на основе звёздного датчика, составляет 6.3"; она складывается из 90% статистической неопределённости $r_{90} = 5.2''$ и систематической ошибки 3.5'', сложенных в квадратуре. К сожалению, получить так называемое улучшенное положение для источника в данном случае оказалось невозможно, поскольку обсерватория *Swift* находилась в аномальном состоянии во время наблюдения SRGA J2306+1556 (Leicester Swift Helpdesk, частное сообщение) из-за проблем с системой управления ориентацией, что повлияло на данные ультрафиолетового телескопа UVOT [93]. Предполагая гауссовский профиль источника, мы можем оценить статистическую неопределённость положения на уровне доверия 98% (как и для *ART-XC* выше) как

²www.swift.ac.uk/user_objects

³www.heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/heasoft

$r_{98} \approx 1.3 r_{90} = 6.8''$, а добавив указанную систематическую ошибку, получить консервативную оценку полной неопределённости положения источника $7.6''$.

Для извлечения спектров мы использовали классы событий (grades) 0–12 в режиме Photon Counting (PC). Метод определения центра источника был установлен в режим ‘единичный проход’ с максимумом 10 попыток. Спектр источника извлекался из окружности радиусом $28.3''$, центрированной на положении рентгеновского источника. Спектр фона извлекался из кольца на расстояниях от $142''$ до $260''$ от источника (рис. 2.1). Мы ограничили спектральный анализ диапазоном 0.3–10 кэВ, как рекомендуется для XRT.

Других источников в пределах областей выделения источника и фона нет. Ближайший источник, обнаруживаемый стандартным конвейером обработки, находится на расстоянии $6'$ от SRGA J2306+1556, что исключает его вклад в извлечённые спектры.

2.2.4 Рентгеновский спектр

Мы выполнили моделирование рентгеновского спектра с помощью ПО *XSPEC* (версия 12.12.0, [44]). Данные *Swift*/XRT и *CPG*/*ART-XC* анализировались совместно, при этом для оценки качества аппроксимации использовалась С-статистика. Мы сгруппировали данные XRT так, чтобы в спектре источника было не менее трёх отсчётов в каждом энергетическом бине. Получившийся спектр источника XRT покрывает диапазон 0.3–5.73 кэВ и содержит в сумме девять отсчётов. Данные *ART-XC* были сгруппированы с минимумом 20 отсчётов на бин в спектре источника. Всего спектр источника *ART-XC* содержит 2701 отсчёт в диапазоне 4–20 кэВ.

Согласно общепринятым представлениям об АЯГ, комптонизация фотонов аккреционного диска в его горячей короне приводит к формированию спектра степенного вида с завалом на высоких энергиях [94; 95], обычно выше ~ 100 кэВ (например, [96]). Также в рентгеновском спектре появляется завал на низких энергиях из-за фотопоглощения. Поскольку спектральный диапазон данных *ART-XC* в нашем анализе ограничен максимальной энергией 20 кэВ (≈ 29 кэВ в системе покоя SRGA J2306+1556), мы не рассматривали завал на высоких энергиях и использовали простую модель степенного закона, мо-

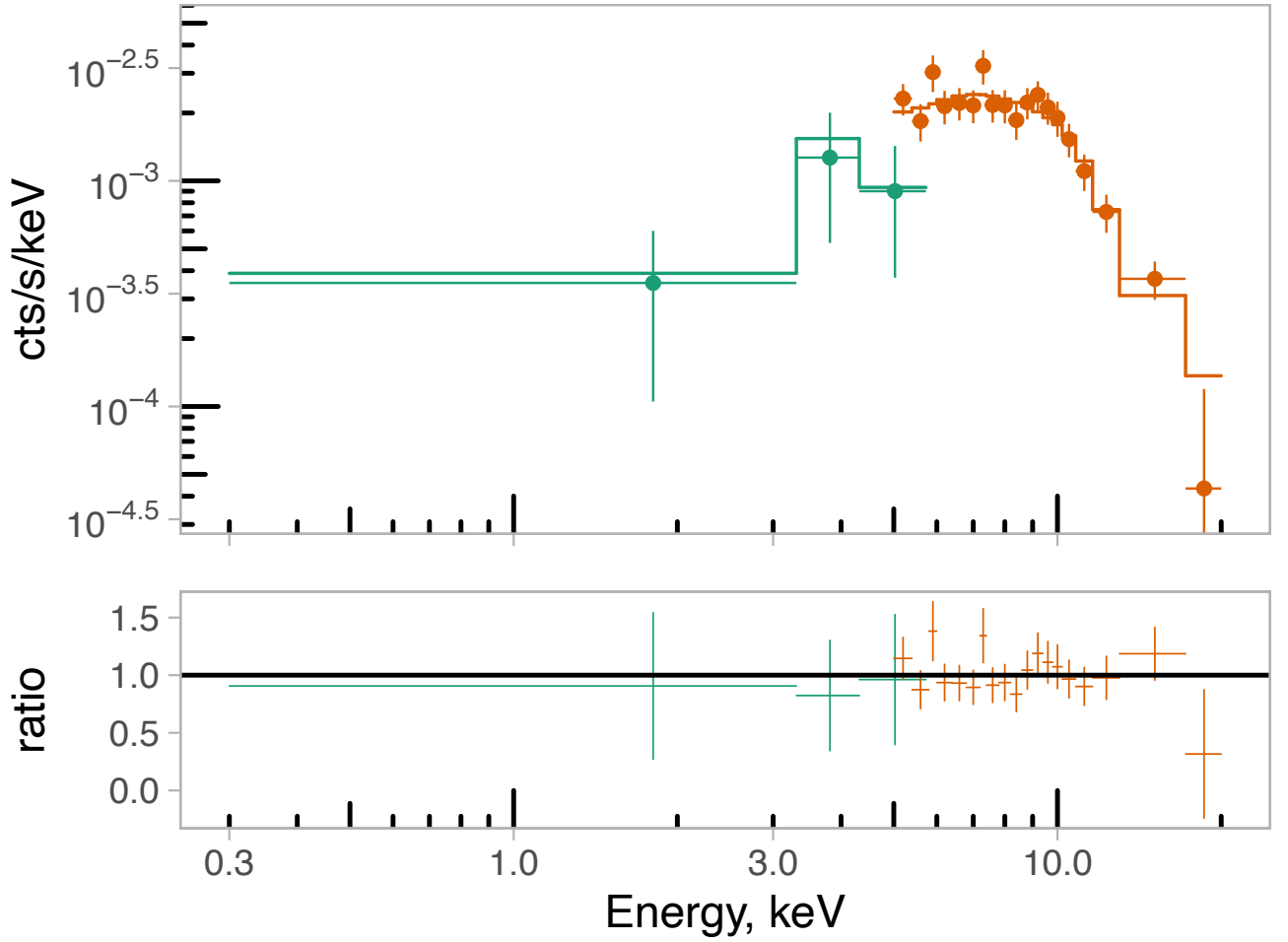


Рисунок 2.2 — Сверху показан рентгеновский спектр SRGA J2306+1556 измеренный с помощью *CPT/ART-XC* (оранжевый) и *Swift/XRT* (зелёный) и аппроксимированный моделью степенного закона с поглощением. Для наглядности спектр *ART-XC* на графике перебинирован. Снизу показано отношение данных к модели. Параметры модели приведены в табл. 2.2. Погрешности показаны на уровне достоверности 1σ .

дифицированную поглощением в Галактике и внутри квазара. Таким образом, использовалась следующая спектральная модель (в терминологии *XSPEC*):

$$\text{TBABS} \times \text{ZTBABS} \times \text{CFLUX} \times \text{ZPOWERLAW}. \quad (2.1)$$

Здесь TBABS — модель галактического межзвёздного поглощения [52]. Мы использовали значение лучевой концентрации водорода в направлении SRGA J2306+1556 из данных обзора HI4PI [53], $N_{\text{H}}^{MW} = 5.7 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, и предполагали солнечное обилие элементов. Для описания внутреннего поглощения, N_{H} , в исследуемом объекте использовалась модель ZTBABS и тоже предполагался стандартный химический состав. Степенной континуум харак-

теризуется фотонным индексом Γ и поправленным за поглощение потоком в наблюдаемом диапазоне 4–10 кэВ (CFLUX), F_{4-10}^{PL} .

Совместный спектр XRT и *ART-XC* хорошо описывается этой моделью, как показано на рис. 2.2. Полученные спектральные параметры представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 — Рентгеновские спектральные параметры.

N_{H}^{MW}	N_{H}	F_{4-10}^{PL}	Γ	F_{4-10}^{PEXRAV}	E	EW	σ_{line}	$Cstat$ (dof)
10^{22} см^{-2}	10^{22} см^{-2}	$10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$		$10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	кэВ	кэВ	кэВ	
TBABS×ZTBABS×CFLUX×ZPOWERLAW								
0.057 (фикс.)	24_{-15}^{+31}	8_{-2}^{+5}	$2.0_{-0.5}^{+0.7}$					57.4 (65)
TBABS(ZTBABS×CFLUX×ZPOWERLAW + CFLUX2×PEXRAV)								
0.057 (фикс.)	18_{-8}^{+10}	$7.6_{-1.5}^{+0.7}$	1.80 (фикс.)	< 0.6				57.8 (65)
TBABS(ZTBABS×CFLUX× ZPOWERLAW + ZGAUSS)								
0.057 (фикс.)	19_{-8}^{+11}	$7.6_{-0.8}^{+0.9}$	1.80 (фикс.)		6.4 (фикс.)	< 1.3	0.01 (фикс.)	57.4 (65)

Неопределённости и верхние пределы для параметров приведены на уровне достоверности 90%. Пометка “фикс.” означает, что значение данного параметра фиксировалось.

Моделирование позволило надежно выявить сильное поглощение рентгеновского излучения внутри объекта. Однако лучевую концентрацию вещества, отвечающего за поглощение, не удастся точно измерить из-за сильной корреляции этого параметра модели с фотонным индексом (см. рис. 2.3). А именно, N_H может лежать в пределах от 10^{23} см^{-2} до $6 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ (90% уровень достоверности).

Полученный наклон степенного континуума, $\Gamma = 2.0_{-0.5}^{+0.7}$, согласуется со значениями, характерными для АЯГ. Сильное поглощение континуума, по видимому, связано с его прохождением через достаточно плотный газопылевой тор. В таком случае часть излучения центрального источника может отражаться от тора в сторону наблюдателя, чтобы приведет к появлению в спектре дополнительной (“отраженной”) компоненты. Поэтому мы добавили в нашу модель компоненту PEXRAV [55]:

$$\text{TBABS} (\text{ZTBABS} \times \text{CFLUX} \times \text{ZPOWERLAW} + \text{CFLUX2} \times \text{PEXRAV}) \quad (2.2)$$

Мы зафиксировали фотонный индекс на значении 1.8 как для основной компоненты ZPOWERLAW, так и для континуума, который используется в модели отражения PEXRAV. Чтобы в PEXRAV учесть только отражённое излучение (без прямого континуума), мы задали параметр `rel_refl` отрицательным. Как и прежде, завал на высоких энергиях не рассматривался. Косинус угла наклона был зафиксирован на значении 0.5, а обилие всех элементов тяжелее гелия бралось как у Солнца [97]. Единственным свободным параметром отраженной компоненты был ее поток в наблюдаемом диапазоне 4–10 кэВ, исправленный за галактическое поглощение (CFLUX2), F_{4-10}^{PEXRAV} .

Как показано в табл. 2.2, нам не удалось обнаружить отражённой компоненты в спектре. Однако получено ограничение, что поток отраженной компоненты составляет менее 8% (на уровне значимости 90%) от исправленного за поглощения потока основного степенного континуума в наблюдаемом диапазоне 4–10 кэВ (5.8–14.4 кэВ в системе покоя квазара) и менее 11% от полного наблюдаемого потока в этом диапазоне. Для принятого наклона спектра $\Gamma = 1.8$ колонка поглощения достаточно жёстко ограничена интервалом 1.0×10^{23} – $2.8 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$. В рамках парадигмы тора АЯГ ожидается, что отражённая компонента вносит менее 15% (точное значение зависит от морфологии и ориентации тора) в суммарное наблюдаемое излучение в диапазоне 5.8–14.4 кэВ

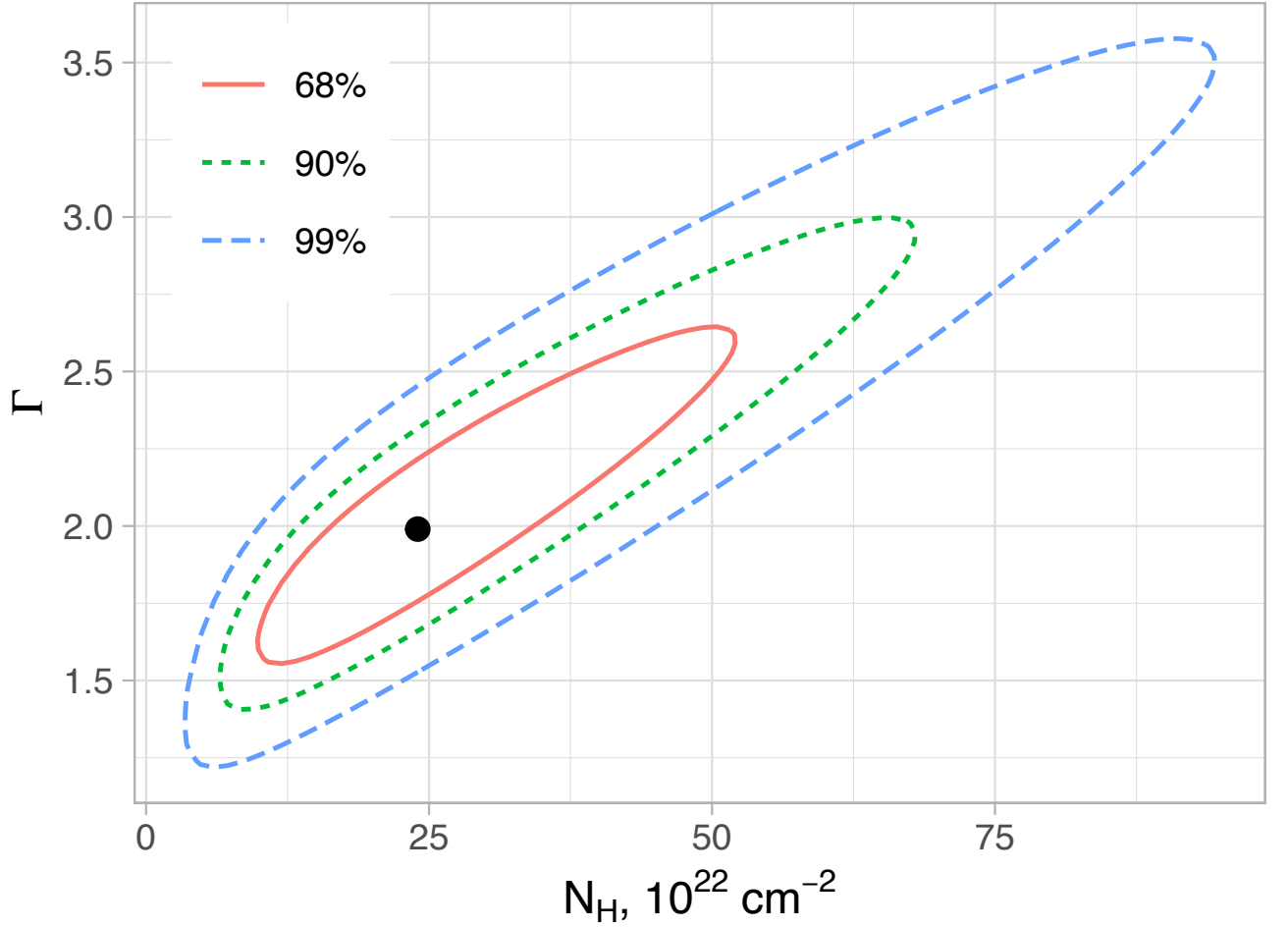


Рисунок 2.3 — Совместные доверительные области параметров N_{H} и Γ модели $\text{TBABS} \times \text{ZTBABS} \times \text{CFLUX} \times \text{ZPOWERLAW}$ на уровнях достоверности 68%, 90% и 99%.

для таких умеренных (комптоновски тонких) лучевых концентраций [98], что согласуется с полученным верхним пределом для SRGA J2306+1556 .

В сценарии отражения рентгеновского излучения тором должна также возникать флуоресцентная линия $\text{K}\alpha$ железа. Поэтому мы добавили гауссову компоненту ZGAUSS на энергии $E = 6.4 \text{ кэВ}$ в системе покоя со свободной нормировкой или, эквивалентно, со свободной эквивалентной шириной EW :

$$\text{TBABS} (\text{ZTBABS} \times \text{CFLUX} \times \text{ZPOWERLAW} + \text{ZGAUSS}). \quad (2.3)$$

Наклон спектра, как и прежде, был зафиксирован на значении $\Gamma = 1.8$.

Аппроксимация данных такой моделью оказывается практически нечувствительной к ширине гауссовского профиля при $\sigma_{\text{line}} < 0.5 \text{ кэВ}$. Поэтому мы зафиксировали её равной 0.01 кэВ для представления результатов в табл. 2.2.

Линия не детектируется, а 90% верхний предел на её эквивалентную ширину составляет 1.3 кэВ. Это согласуется с ожидаемой интенсивностью линии 6.4 кэВ, $EW < 200$ эВ, для торов с $N_H \lesssim 3 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ и солнечным обилием железа [98].

2.2.5 Быстрая переменность

Далее была изучена кратковременная (внутрисуточная) переменность рентгеновского излучения SRGA J2306+1556. С этой целью мы построили кривые блеска (скорость счёта как функция времени, в интервалах по 1 часу) во время направленного наблюдения *ART-XC* в основном энергетическом диапазоне 4–12 кэВ и в двух дополнительных: 4–8 и 12–16 кэВ (рис. 2.4). Поскольку *Swift*/XRT зарегистрировал лишь десять отсчётов в диапазоне 0.3–10 кэВ из области источника за время своего короткого (≈ 40 мин) наблюдения, мы не использовали эти данные для исследования переменности.

Чтобы проверить, изменяется ли рентгеновский поток в данном энергетическом диапазоне в ходе наблюдения, мы оценивали статистику χ^2 следующим образом:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - \bar{f})^2}{\sigma_i^2}, \quad (2.4)$$

где f_i – скорость счёта в i -м временном интервале, σ_i – соответствующая погрешность, $\bar{f}$ – взвешенное среднее значение скорости счёта за всё наблюдение, N – общее число измерений. Соответственно, мы определяем $1 - p$ – вероятность получить случайным образом значение χ^2 , превышающее измеренное, для $\text{dof} = N - 1$ степеней свободы при гипотезе, что скорость счёта оставалась постоянной в ходе наблюдения.

Чтобы оценить амплитуду рентгеновской переменности, вычислялась нормированная избыточная дисперсия (normalized excess variance), представляющая собой дисперсию, нормированную на средний поток и поправленную на

⁴Кривые блеска содержат $\gtrsim 25$ отсчётов на бин в диапазонах 4–8 кэВ и 4–12 кэВ и $\gtrsim 10$ отсчётов на бин в диапазоне 12–16 кэВ, поэтому нормальное (гауссово) приближение применимо для такого анализа.

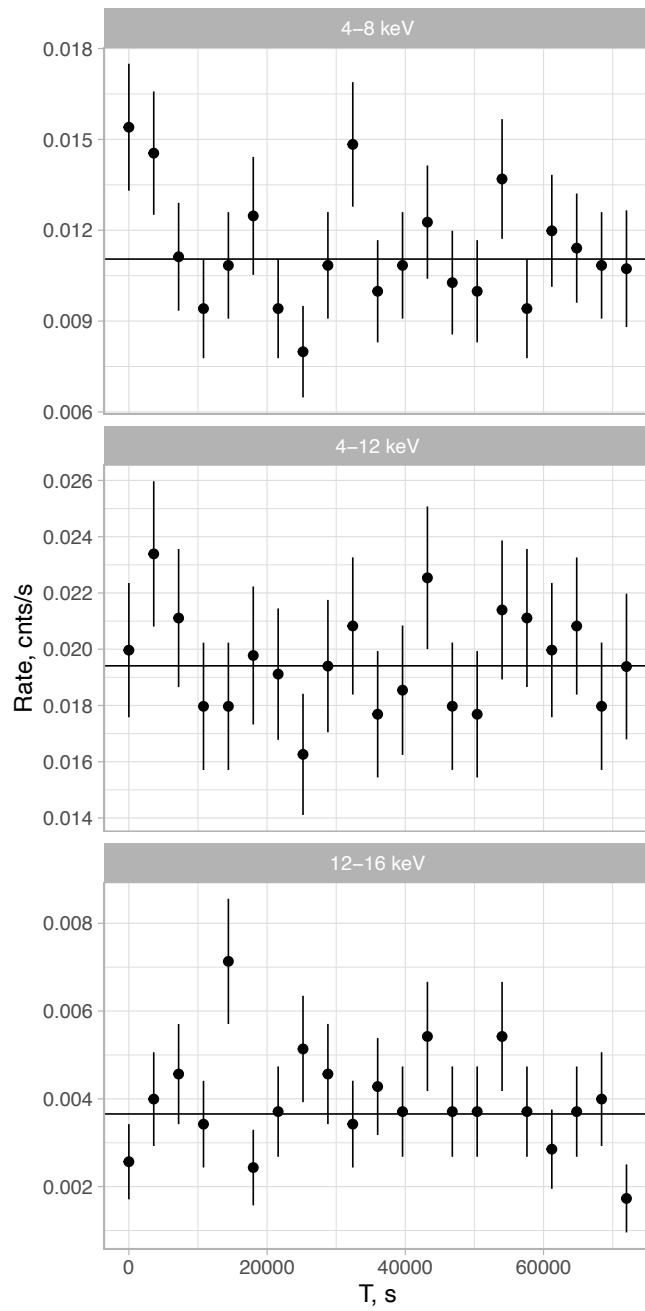


Рисунок 2.4 — Рентгеновские кривые блеска SRGA J2306+1556 в трёх энергетических диапазонах, полученные телескопом *ART-XC* во время направленного наблюдения и показанные в часовых интервалах. Погрешности показаны на уровне 1σ .

Таблица 2.3 — Характеристики кратковременной рентгеновской переменности.

Диапазон, кэВ	$\bar{R}$, отсч с ⁻¹	χ^2 (dof)	$1 - p$	σ_{RMS}^2
4–8	0.011	21.88 (20)	0.35	0.004 ± 0.008
4–12	0.019	11.39 (20)	0.94	-0.0063 ± 0.0022
12–16	0.004	23.98 (20)	0.24	0.02 ± 0.03

ошибки измерений потока [99]:

$$\sigma_{\text{rms}}^2 = \frac{S^2 - \overline{\sigma_{\text{err}}^2}}{\langle f \rangle^2}, \quad (2.5)$$

где

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_i - \langle f \rangle)^2 \quad (2.6)$$

и

$$\overline{\sigma_{\text{err}}^2} = \frac{1}{N} \sum_i \sigma_i^2. \quad (2.7)$$

Погрешность σ_{rms}^2 можно оценить следующим образом [100]:

$$\delta \sigma_{\text{rms}}^2 = \frac{s_D}{\langle f \rangle^2 \sqrt{N}}, \quad (2.8)$$

где

$$s_D^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{[(f_i - \langle f \rangle)^2 - \sigma_i^2] - \sigma_{\text{rms}}^2 \langle f \rangle^2\}^2. \quad (2.9)$$

В табл. 3.2 приведены полученные значения средней скорости счёта $\bar{R}$, $\chi^2(\text{dof})$, $1 - p$ и σ_{rms}^2 для каждого энергетического диапазона. Рентгеновский поток не продемонстрировал статистически значимой переменности (т.е. при $1 - p > 0.05$) на протяжении ~ 20 -часового периода наблюдений телескопа *ART-XC*.

2.2.6 Долговременная переменность

Используя доступные данные обзора всего неба и направленных наблюдений *ART-XC* (табл. 2.1), можно также исследовать переменность рентгеновского излучения SRGA J2306+1556 на масштабах порядка года. Для этого

по данным обзора всего неба мы выполнили принудительную фотометрию в области радиусом $71''$ вокруг положения SDSS J230630.38+155620.4. Затем преобразовали измеренные скорости счёта в энергетические потоки в диапазоне 4–12 кэВ, предполагая спектр как у Крабовидной туманности⁵ и применив 96%-ную поправку на апертуру. 90% верхние пределы были рассчитаны по уравнению (7) из [101] при $S = 1.282$. Соответствующий фон оценивался по измерениям *ART-XC* в диапазоне 30–70 кэВ (см. подробности в [21]). Полученные потоки приведены в табл. 2.4.

Для направленного наблюдения *ART-XC* мы оценили наблюдаемый поток в диапазоне 4–12 кэВ, используя нашу основную спектральную модель CFLUX×TBABS×ZTBABS×ZPOWERLAW (см. табл. 2.2). Он составляет $(7.6 \pm 0.3) \times 10^{-13}$ эрг с⁻¹ см⁻² на уровне доверия 1σ (см. также последнюю строку табл. 2.4).

Получившаяся кривая блеска в диапазоне 4–12 кэВ показана на рис. 2.5. Явно видна сильная переменность. Источник был относительно ярким во время первых проходов в ходе обзора всего неба *ART-XC* в период с 3 июня 2020 года по 11 декабря 2021 года. Максимальный поток $13_{-6}^{+9} \times 10^{-12}$ эрг с⁻¹ см⁻² был достигнут во втором проходе (7 декабря 2020 года), хотя переменность между первыми четырьмя проходами статистически незначима. Формально, источник был обнаружен с высокой статистической значимостью во втором проходе и менее значимо – в первом и четвёртом (см. табл. 2.4). Детектирование SRGA J2306+1556 на суммарной карте первых четырёх обзоров всего неба *ART-XC* также является надёжным (значимость детектирования методом максимального правдоподобия $S/N = 5.65$), а соответствующий средний поток составляет $(4.6 \pm 1.6) \times 10^{-12}$ эрг с⁻¹ см⁻² (4–12 кэВ, [21]). Впоследствии, во время направленного наблюдения 3 июня 2023 года, квазар был слабее в 9–30 раз по сравнению с максимальным потоком, измеренным 7 декабря 2020 года. Еще позже, в ходе возобновлённого обзора всего неба – 13 декабря 2023 года, 15 июня 2024 года и 17 декабря 2024 года – источник больше не детектировался, однако полученные верхние пределы на его поток не являются очень строгими.

Таким образом, можно предположить, что SRGA J2306+1556 пережил рентгеновскую вспышку в 2020–2021 годах и находился в “низком” состоянии в июне 2023 года. С учётом отсутствия данных до 2020 года и перерывов в мони-

⁵Как обсуждается в [21], коэффициент пересчёта энергетического потока в скорость счёта почти не зависит от формы спектра.

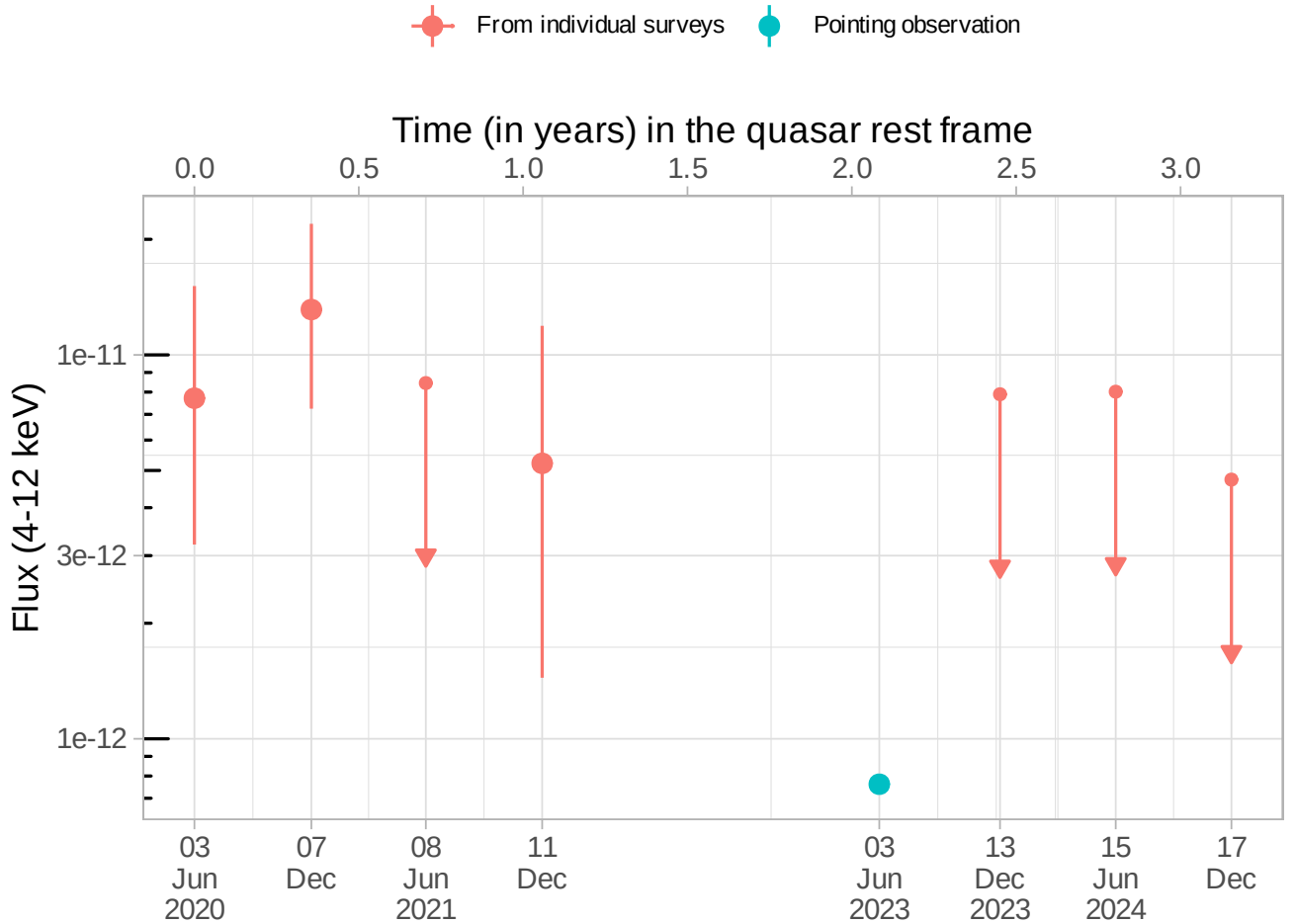


Рисунок 2.5 — Долговременная рентгеновская кривая блеска SRGA J2306+1556. Показан наблюдаемый поток в диапазоне 4–12 кэВ. По нижней горизонтальной оси отложены даты наблюдений, по верхней — время, прошедшее с момента первого наблюдения источника в его системе покоя. Погрешности показаны на уровне 1σ , а верхние пределы — на уровне достоверности 90%.

торинге после этого, вспышка могла длиться ~ 1 год или более в системе покоя квазара. Важно, что эту переменность нельзя объяснить переменным поглощением. Действительно, из результатов нашего рентгеновского спектрального анализа в разделе 2.2.4 следует, что внутреннее поглощение, хотя и существенное, ослабляло наблюдаемый поток 4–12 кэВ лишь в 1.3 раза, что значительно меньше падения потока, обнаруженного во время направленного наблюдения, относительно “высокого” состояния, зафиксированного в ходе обзора всего неба *CPG/ART-XC*. Следовательно, вспышка была вызвана именно ростом внутренней светимости, а не исчезновением холодного газа с луча зрения.

Также стоит отметить, что за такой рентгеновской вспышкой должно было следовать “эхо” из-за рассеяния части излучения центрального источника

Таблица 2.4 — Информация о детектировании SRGA J2306+1556 в разных проходах во время обзора всего неба *ART-XC*.

<i>ART-XC</i> обзор	S	B	$1 - p$	$F_{4-12},$ $10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$
1	4	0.69	0.005361	8_{-5}^{+7}
2	6	0.65	0.000060	13_{-6}^{+9}
3	1	0.79	0.544614	< 8
4	3	0.71	0.035158	5_{-4}^{+7}
6	1	0.44	0.359156	< 8
7	1	0.49	0.384645	< 8
8	0	0.43	1.000000	< 5
точечное				0.76 ± 0.03

S – число наблюдаемых отсчётов; B – предсказанное число фоновых отсчётов в области источника в диапазоне 4–12 кэВ; $(1 - p)$ – вероятность нулевой гипотезы (т.е. что источника нет) при предположении пуассоновской статистики фотонов: $Pr(N \geq S | \lambda = B)$; F_{4-12} – наблюдаемый поток в диапазоне 4–12 кэВ. Неопределённости указаны на уровне 1σ , верхние пределы — на уровне достоверности 90%. Необходимо отметить, что SRGA J2306+1556 не был просканирован телескопом *ART-XC* в ходе неполного пятого обзора всего неба в декабре 2021–марте 2022.

в окружающем торе. Хотя результат сильно зависит от ориентации и структуры тора, минимальная длительность отражённого сигнала определяется внутренним радиусом тора, R_{dust} . Для оценённой болометрической светимости SRGA J2306+1556 $L_{\text{bol}} \sim 6 \times 10^{46} \text{ эрг с}^{-1}$ (см. разд. 2.4 ниже) ожидается $R_{\text{dust}} \sim 2 \text{ пк}$ из физических соображений (сублимация пыли) и исследований активных ядер галактик методом эхокартирования (например, [102]). Это соответствует временным масштабам более ~ 6 лет. Поэтому отсутствие сильной отражённой компоненты в рентгеновском спектре SRGA J2306+1556 в его низком состоянии не является удивительным.

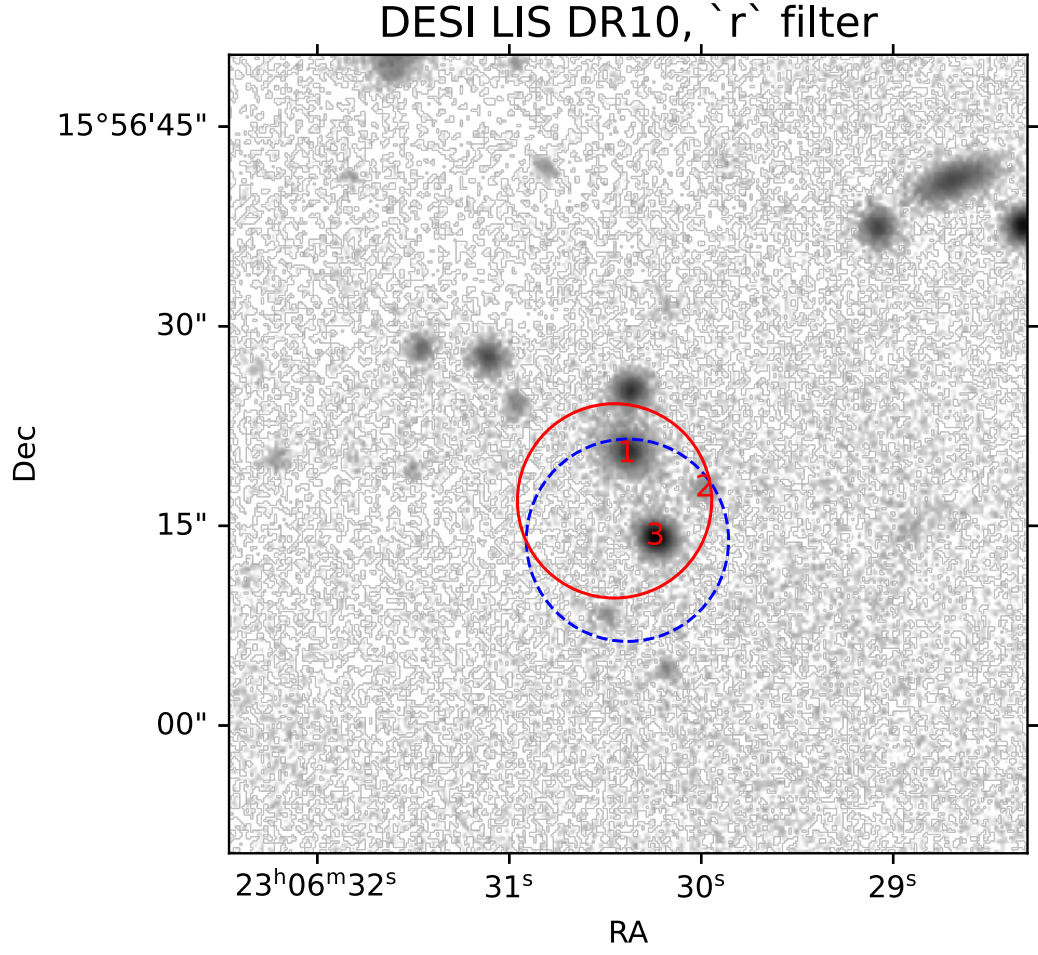


Рисунок 2.6 — Оптическое изображение в фильтре r из LS DR10. Красная сплошная и синяя штриховая окружности обозначают 98% области локализации рентгеновского источника по данным точечных наблюдений *CPT/ART-XC* и *Swift/XRT* с радиусами $7.3''$ и $7.6''$, соответственно. Цифрами отмечены оптические источники, попадающие в перекрывающуюся область этих регионов (см. табл. 2.5).

2.3 Многоволновые наблюдения

Таблица 2.5 — Оптические/ИК объекты внутри совместной области локализации рентгеновского источника *CPG/ART-XC-Swift/XRT*.

LS							UKIRT HS			LS-WISE			
Offset	RA	DEC	g	r	z	Тип	J	K	Класс	$W1$	$W2$	$W3$	$W4$
Источник 1													
0.0	346.62658	15.93905	21.17 ± 0.02	19.861 ± 0.009	18.791 ± 0.015	SER	17.8 ± 0.2	15.77 ± 0.12	Гал.	14.606 ± 0.008	13.309 ± 0.009	9.28 ± 0.02	5.78 ± 0.06
Источник 2													
6.3	346.62494	15.93828	24.14 ± 0.19	22.28 ± 0.05	21.37 ± 0.10	REX	—	—	—	18.09 ± 0.13	> 18.1	> 12.8	> 8.2
Источник 3													
6.7	346.62603	15.93728	21.802 ± 0.018	19.900 ± 0.005	17.777 ± 0.003	PSF	16.19 ± 0.03	15.26 ± 0.04	Гал.	16.89 ± 0.05	15.76 ± 0.06	13.1 ± 0.8	> 8.2
7.3	346.62578	15.93717	23.84 ± 0.11	21.95 ± 0.03	19.727 ± 0.018	PSF				15.328 ± 0.012	15.67 ± 0.06	> 12.8	10 ± 3

Первые семь столбцов содержат информацию из LS DS10, а именно: угловое расстояние (в угловых секундах) от SDSS J230630.38+155620.4, координаты ICRS, величины g , r и z (в системе AB), а также морфологическую классификацию. В следующих трех столбцах приведены величины J , K (в системе Вега) и классификация (Гал. — галактика) из UHS DR2. Последние четыре столбца содержат величины $W1$, $W2$, $W3$ и $W4$ (в системе Вега), полученные методом принудительной фотометрии *WISE* по координатам из LS DR10.

На рис. 2.6 представлено оптическое изображение размером $1' \times 1'$ в окрестности SRGA J2306+1556, полученное в фильтре r в рамках DESI Legacy Surveys (LS, [103]). В перекрывающейся области локализаций *CPT/ART-XC* и *Swift/XRT* находятся три оптических/ИК объекта. В табл. 2.5 приведены фотометрические данные из десятого выпуска LS (DR10) и второго выпуска UKIRT Hemisphere Survey (UHS DR2, [104]).

Помимо оптической фотометрии (g, r, z), LS DR10 предоставляет фотометрию в среднем инфракрасном диапазоне (СИК) по данным *Wide-field Infrared Survey Explorer* (*WISE*). А именно, потоки в полосах $W1, W2, W3$ и $W4$ измерены с использованием всех изображений *WISE* вплоть до 7-го года миссии NEOWISE-Reactivation посредством принудительной фотометрии в положениях оптических источников LS и с учётом их профилей яркости, определённых по изображениям LS. Эти данные мы извлекли через веб-сервис⁶. Мы вычислили величины $g, r, z, W1, W2, W3$ и $W4$ в системе AB из соответствующих измерений потоков (в nanomaggies) в таблице `ls_dr10.tractor`, используя стандартное соотношение $m = 22.5 - 2.5 \log_{10} \text{flux}$; дополнительно преобразовали величины $W1, W2, W3$ и $W4$ в систему Вега для удобства сравнения со стандартными СИК-диагностиками АЯГ; и соответствующим образом пересчитали связанные неопределённости ($1/\sqrt{\text{inverse variance of flux}}$). Для источников с отрицательными потоками в отдельных полосах мы оценили 2σ верхние пределы. Потоки LS DR10 основаны на наилучшей модели профиля (см. табл. 2.5) для каждого источника⁷. Возможные морфологические типы: точечный источник ('PSF'), круглая экспоненциальная галактика ('REX'), профиль де Вокулёра (эллиптическая галактика, 'DEV'), экспоненциальный профиль (спиральная галактика, 'EXP') и профиль Серсика ('SER').

Каталог UHS DR2 предоставляет фотометрические данные в двух полосах ближнего инфракрасного диапазона (БИК), J и K , с величинами, откалиброванными в фотометрической системе Вега. Мы использовали петросьяновские величины из этого каталога, поскольку такой тип величин лучше подходит для протяжённых источников.

Источник №1 – SDSS J230630.38+155620.4. Он протяжённый на оптическом изображении (профиль яркости Серсика), а его оптический спектр типичен для АЯГ 2-го типа, как будет обсуждаться в разд. 2.3.1. Кроме того,

⁶<https://datalab.noirlab.edu>

⁷<https://www.legacysurvey.org/dr10/description>

у него $W1 - W2 \approx 1.3$, что существенно превышает стандартный порог $W1 - W2 = 0.8$ для надёжной идентификации АЯГ [78]. Если предположить, что этот объект является истинным компаньоном SRGA J2306+1556, то можно оценить отношение его СИК-светимости (λL_λ при $12 \mu\text{м}$) к рентгеновской (2–10 кэВ). Интерполируя между измерениями в полосах $W3$ и $W4$ (практически не подверженных поглощению в Галактике), находим $\lambda L_\lambda(12 \mu\text{м}) \approx 2.7 \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$. Для сравнения, во время обзора всего неба *CPI/ART-XC* SRGA J2306+1556 демонстрировал исправленную за поглощение светимость $6_{-3}^{+6} \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$ в диапазоне 2–10 кэВ в системе покоя, а во время точечного наблюдения *ART-XC* рентгеновская светимость источника была значительно ниже, $1.0_{-0.3}^{+0.8} \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$. Это соответствует отношениям $\lambda L_\lambda(12 \mu\text{м})/L(2\text{--}10 \text{ кэВ}) = 0.3 \div 0.9$ и $1.5 \div 3.9$ для ‘высокого’ и ‘низкого’ рентгеновских состояний соответственно (пренебрегая возможной переменностью в СИК). Здесь мы исправили наблюдаемые рентгеновские потоки за внутреннее поглощение, используя $N_{\text{H}} \sim 2 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$, полученное из нашего рентгеновского спектрального анализа, и учли соответствующую неопределённость. Полученные значения близки к типичному для АЯГ отношению светимостей на $12 \mu\text{м}$ и в 2–10 кэВ ~ 2 [66; 105; 106]. Следовательно, источник №1 несомненно является АЯГ и с высокой вероятностью является оптическим компаньоном рентгеновского источника SRGA J2306+1556.

Источник №2 очень тусклый. На изображениях LS есть указание на его протяжённость (см. табл. 2.5), следовательно, это может быть галактика. Источник не обнаружен в UHS ни в фильтре J , ни в K . Для него нет опубликованной оптической спектроскопии, а по данным *WISE* он лишь едва детектируется. Его СИК-цвет $W1 - W2 \lesssim 0.1$ убедительно свидетельствует против природы АЯГ. Если тем не менее рассмотреть гипотезу, что это аналог SRGA J2306+1556 и объект является АЯГ, то можно оценить отношение его СИК и рентгеновской светимостей, подобно нашему анализу для источника №1 выше. В частности, опираясь на измерение в полосе $W1$ и верхние пределы на потоки в $W2$, $W3$ и $W4$, и предполагая степенной СИК спектр (что характерно для АЯГ, см. например, [107]), получаем верхний предел на поток λF_λ ($12 \mu\text{м}$ в системе покоя) $3 \times 10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ для красных смещений $z < 1$, тогда как непоглощенный поток в диапазоне 2–10 кэВ в системе покоя составляет $(3 \div 14) \times 10^{-12}$ и $(1.0 \div 1.6) \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ для высокого и низкого рентгеновских состояний соответственно (с учётом неопределённости во внутреннем поглощении

рентгеновского излучения в зависимости красного смещения). Таким образом, отношение λL_λ ($12\ \mu\text{м}$)/ $L(2\text{--}10\ \text{кэВ})$ оказывается меньше 3×10^{-3} , что намного ниже того, что ожидается для АЯГ. Следовательно, источник №2 не связан с SRGA J2306+1556.

Источник №3 – это звезда на расстоянии 660 ± 300 пк со значительным собственным движением $20.5 \pm 1.0\ \text{mas год}^{-1}$ согласно астрометрии *Gaia* (*Gaia* Data Release 3, [108]). Однако имеются серьёзные указания на то, что это не одиночный объект. Во-первых, в LS DR10 он указан как пара звездообразных объектов (морфология PSF) на угловом расстоянии $0.95''$ друг от друга. Во-вторых, UHS DR2 классифицирует этот источник как одиночный источник морфологического типа ‘галактика’. В-третьих, астрометрическое решение *Gaia* характеризуется величиной Renormalized Unit Weight Error (RUWE) 1.85, что значительно превышает порог ~ 1.3 для одиночных звёзд [109]. Следовательно, мы можем иметь дело с двойной системой. Если бы она была связана с SRGA J2306+1556, её исправленная за поглощение рентгеновская светимость составляла бы $\sim 10^{32}\ \text{эрг с}^{-1}$ (2–10 кэВ). Такая светимость могла бы соответствовать катаклизмической переменной (КП), что потребовало бы наличия третьего (неразличимого) компонента – белого карлика. Однако, аппроксимируя совместный спектр *ART-XC*–*XRT* степенной моделью с поглощением при $z = 0$, мы получаем $N_{\text{H}} = 7_{-4}^{+9} \times 10^{22}$ (на уровне достоверности 90%), тогда как у КП никогда не наблюдаются столь сильно поглощённых рентгеновских спектров. Более того, объект №3 на несколько звёздных величин слабее в оптике, чем типичные КП с такими высокими рентгеновскими потоками (например, [110]).

Мы приходим к выводу, что SDSS J230630.38+155620.4 (источник №1) является оптическим компаньоном рентгеновского источника SRGA J2306+1556. Также отметим, что согласно классификатору кривых блеска ALeRCE [111] потока оповещений Zwicky Transient Facility (ZTF)⁸ за период 2019–2025 оптических вспышек ни у SDSS J230630.38+155620.4, ни у какого-либо другого объекта в пределах $30''$ от SRGA J2306+1556 не обнаружено.

⁸<https://alerce.online>

2.3.1 Оптические спектры

13 ноября 2012 года (MJD 56244) на 2.5-м телескопе Обсерватории Апачи-Пойнт (Нью-Мексико, США) в рамках спектроскопического обзора барионных осцилляций (BOSS, [41]), являющегося частью SDSS, был получен спектр SDSS J230630.38+155620.4. Спектрограф BOSS [42] покрывает диапазон длин волн 3560–10400 Å с переменным спектральным разрешением 2–5 Å. Средняя полная ширина на полувысоте $FWHM_{\text{res}} = 3.2 \text{ Å}$, с учётом обоих каналов – красного и синего. Во время наблюдения в фокальной плоскости телескопа была установлена пластина 6134, причём волокно 337 было наведено на данный объект.

На рис. 2.7 показан спектр SDSS J230630.38+155620.4, полученный из SDSS Science Archive Server⁹. Мы не применяли к этому спектру никаких дополнительных процедур обработки. Однако автоматический конвейер SDSS (v5_13_2) некорректно классифицировал источник как ‘QSO BROADLINE’ из-за плохой подгонки спектральных линий. Поэтому мы повторно провели анализ спектральных линий, чтобы получить их корректные параметры.

Сначала мы исправили спектр за поглощение в Галактике, используя $E(B - V) = 0.20$ – значение, полученное для координат источника сервисом IRSA Galactic Dust Reddening and Extinction¹⁰ на основе карт [112]. Поправка предполагает $R_V = 3.1$ и использует кривую экстинкции из [63]. Затем мы аппроксимировали все идентифицированные линии гауссовыми функциями для вычисления красного смещения. Континуум спектра аппроксимировался полиномиальной функцией. Для удобства мы разделили спектр на несколько участков: $6200 \text{ Å} < \lambda < 7000 \text{ Å}$ (область H α), $4200 \text{ Å} < \lambda < 5100 \text{ Å}$ (область H β) и $3317 \text{ Å} < \lambda < 4000 \text{ Å}$, исключив диапазон $\lambda = 3860\text{--}3880 \text{ Å}$. В каждом сегменте линии и континуум подгонялись одновременно. После измерения центров линий мы вычислили барицентрически скорректированное красное смещение $z = 0.43891 \pm 0.00008$ (неопределённость 1σ). Доверительный интервал для красного смещения определялся с использованием t -распределения Стьюдента. Это красное смещение соответствует фотометрическому расстоянию $2426.32 \pm 0.5 \text{ Мпк}$ для принятой космологии.

⁹<https://dr16.sdss.org/optical>

¹⁰<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST>

Рисунок 2.7 — Сверху: спектр SDSS. Снизу: спектр DESI. Оба спектра исправлены за поглощение в Галактике; эмиссионные линии подписаны. Для наглядности спектры были сглажены алгоритмом скользящего среднего с окном в пять бинов.

Таблица 2.6 — Характеристики спектральных линий SDSS J230630.38+155620.4.

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-15} эрг с $^{-1}$ см $^{-2}$	EW, Å	FWHM, 10^2 км с $^{-1}$
[NeV] λ 3346	4814.0 ± 0.3	0.269 ± 0.018	-17.8 ± 1.1	6.1 ± 0.7
[NeVI] λ 3426	4930.83 ± 0.12	0.601 ± 0.017	-37.2 ± 1.0	5.1 ± 0.2
[OII] λ 3726	5364.33 ± 0.08	1.100 ± 0.019	-61.4 ± 1.0	5.45 ± 0.15
H ϵ	5710.4 ± 0.5	0.29 ± 0.02	-17.3 ± 1.3	6.3 ± 0.8
H γ	6246.0 ± 0.3	0.302 ± 0.019	-13.2 ± 0.8	4.0 ± 0.4
HeII	6743.9 ± 0.3	0.251 ± 0.014	-9.5 ± 0.5	4.4 ± 0.4
H β	6996.02 ± 0.12	0.812 ± 0.017	-28.6 ± 0.5	5.01 ± 0.17
[OIII] λ 4959	7136.57 ± 0.04	3.10 ± 0.02	-105.5 ± 0.8	4.90 ± 0.06
[OIII] λ 5007	7205.33 ± 0.02	9.40 ± 0.05	-314.4 ± 1.6	4.78 ± 0.03
[OI] λ 6300	9068.6 ± 0.8	0.154 ± 0.019	-4.9 ± 0.5	4.2 ± 0.9
[NII] λ 6548	9421.3 ± 1.0	0.41 ± 0.05	-12.8 ± 1.6	4.4 ± 1.0
H α	9443.90 ± 0.19	4.11 ± 0.10	-124 ± 3	5.4 ± 0.2
[NII] λ 6584	9474.5 ± 0.4	1.22 ± 0.06	-36.9 ± 1.6	4.8 ± 0.4
[SII] λ 6716	9664.5 ± 1.2	0.47 ± 0.07	-13.8 ± 1.9	4.8 ± 1.0
[SII] λ 6731	9686.5 ± 1.6	0.40 ± 0.09	-12 ± 3	5.1 ± 1.8

Длины волн приведены в системе наблюдателя, а эквивалентные ширины – в системе покоя источника. Неопределённости указаны на уровне достоверности 1σ .

Линии излучения

Идентифицированные линии, а также их наблюдаемые длины волн, потоки, эквивалентные ширины (EW) и полные ширины на полувысоте ($FWHM$) приведены в табл. 2.6. Значения $FWHM$ (пересчитанные в скорости) вычислялись как:

$$FWHM = \frac{\sqrt{FWHM_{\text{mes}}^2 - FWHM_{\text{res}}^2(\lambda)}}{1 + z}, \quad (2.10)$$

где $FWHM_{\text{mes}}$ – измеренная ширина линии, а $FWHM_{\text{res}}$ – спектральное разрешение на наблюдаемой центральной длине волны λ . Доверительные интервалы

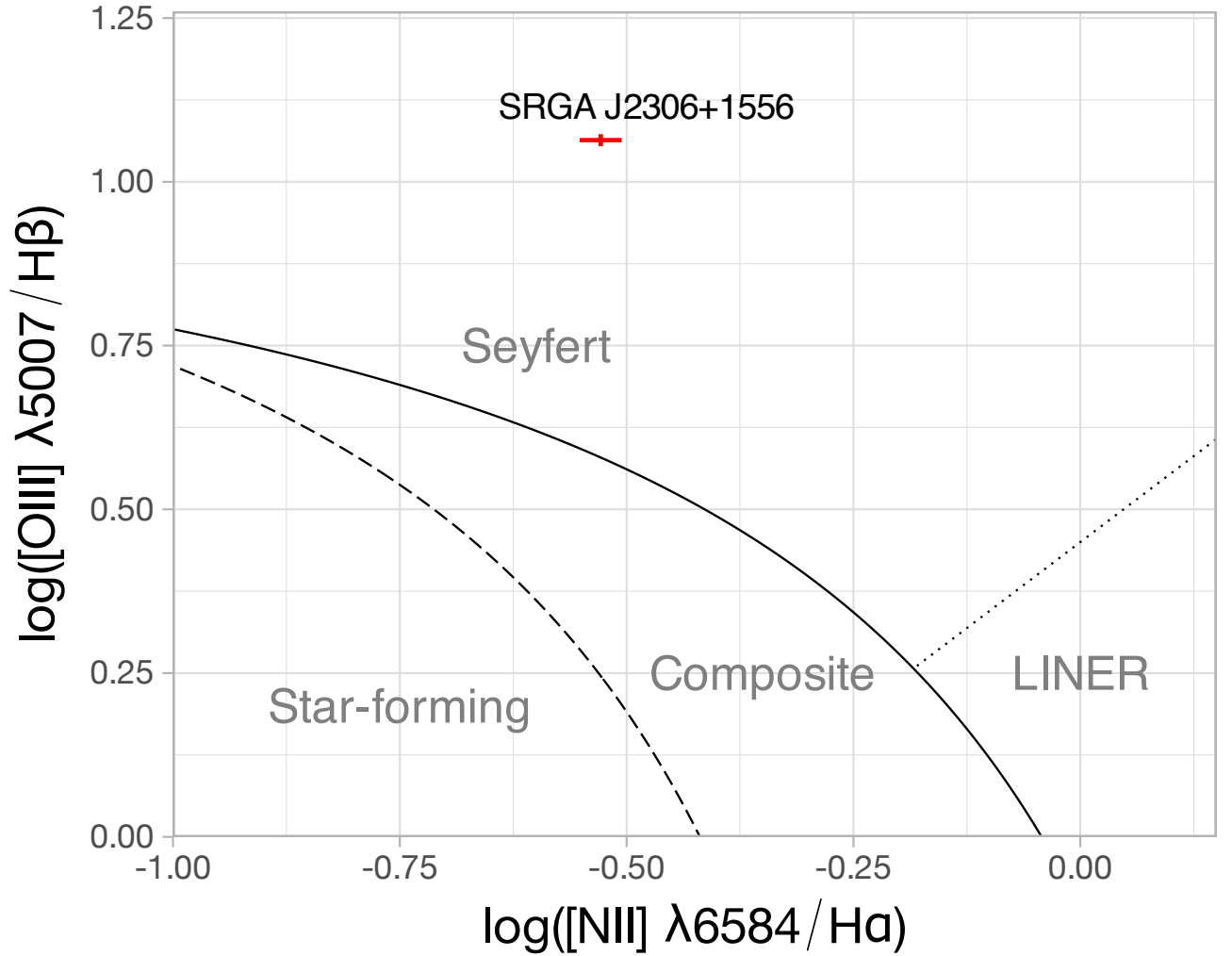


Рисунок 2.8 — Положение SRGA J2306+1556 на диаграмме BPT [59] и соответствующие погрешности 1σ (красным цветом). Границы, разделяющие различные типы галактик, взяты из: [60] — сплошная линия; [61] — штриховая линия; [62] — пунктирная линия.

для EW были получены методом Монте-Карло. А именно, предполагая, что ошибки потоков подчиняются нормальному распределению, мы сгенерировали 1000 реализаций спектра и оценили EW для каждой из них. Затем доверительные интервалы были определены по полученному распределению EW .

Все обнаруженные в спектре эмиссионные линии — как линии серии Бальмера, так и множество запрещённых линий — имеют доплеровские ширины порядка 500 км с^{-1} , что характерно для АЯГ 2-го типа. Отношения потоков ключевых пар линий составляют $\log([OIII]\lambda 5007/H\beta) = 1.064 \pm 0.009$ и $\log([NII]\lambda 6584/H\alpha) = -0.53 \pm 0.02$. Таким образом, источник попадает в область сейфертов на диаграмме Бальдвина-Филлипса-Терлевича (BPT) (рис. 2.8).

На основе измеренных потоков бальмеровских линий мы можем оценить бальмеровский декремент в направлении области узких линий (NLR): $(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{\text{measured}} = 5.1 \pm 0.2$. Это значение попадает в 1σ -интервал (3.5–5.5) распределения бальмеровских декрементов NLR, найденного [113] для большой выборки АЯГ из обзора SDSS, и указывает на наличие пыли в NLR и/или окружающей среде. При отсутствии пыли ожидаемый внутренний бальмеровский декремент для NLR составляет $\text{H}\alpha/\text{H}\beta \approx 3.1$, т.е. несколько выше значения 2.85, соответствующего рекомбинации в случае В, что объясняется столкновительным возбуждением $\text{H}\alpha$ [114]. Тогда можно оценить внутреннюю экстинкцию в направлении NLR объекта SRGA J2306+1556 (снова предполагая $R_V = 3.1$ и используя кривую экстинкции [63]): $A_V = 7.202 [\log(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{\text{measured}} - \log 3.1] = 1.5 \pm 0.1 \text{ mag}$, или $E(B - V) = 0.50 \pm 0.03$ (здесь полосы B и V определены в системе покоя объекта). Соответственно, ослабление в эмиссионной линии $\text{O[III]}\lambda 5007$, обсуждаемой ниже, можно оценить как $A(\text{O[III]}) = 3.475 A_V/R_V = 1.7 \pm 0.1 \text{ mag}$.

Континнуум

В спектре присутствует слабый, но статистически значимый оптический континуум. Линии излучения $[\text{NeV}]\lambda 3346$, $[\text{NeVI}]\lambda 3426$ и $[\text{OII}]\lambda 3726$ дают вклад $(1.97 \pm 0.03) \times 10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, что составляет 10% от суммарного излучения в полосе g камеры Dark Energy Camera (DECam). Линии $\text{H}\epsilon$, $\text{H}\gamma$, HeII , $\text{H}\beta$, $[\text{OIII}]\lambda 4959$ и $[\text{OIII}]\lambda 5007$ дают вклад $(1.415 \pm 0.007) \times 10^{-14} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, или 40% в полосу r . Линии $[\text{OI}]\lambda 6300$, $[\text{NII}]\lambda 6548$, $\text{H}\alpha$, $[\text{NII}]\lambda 6584$, $[\text{SII}]\lambda 6716$ и $[\text{SII}]\lambda 6731$ дают вклад $(6.8 \pm 0.2) \times 10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, или 14% в полосу z .

Исправив приведённые в табл. 2.6 оптические/ИК фотометрические величины за поглощение в Галактике в направлении на SDSS J230630.38+155620.4 по стандартной процедуре, описанной в документации LS DR10, получаем следующие значения: $g = 20.43 \pm 0.02$, $r = 19.358 \pm 0.009$, $z = 18.510 \pm 0.015$, $J = 17.6 \pm 0.2$ и $K = 15.77 \pm 0.12$, $W1 = 14.563 \pm 0.008$, $W2 = 13.284 \pm 0.009$, $W3 = 9.27 \pm 0.02$, и $W4 = 5.78 \pm 0.06$. Если теперь предположить, что линейное излучение не вносит существенного вклада за пределами центральной области SDSS J230630.38+155620.4 радиусом $\sim 1''$ (или $\sim 6 \text{ кпк}$), что соответ-

ствуется апертуре спектроскопии SDSS/BOSS, то вычитая оценённые выше по спектрофотометрии потоки линий, получаем испарвленные за поглощение в Галактике величины $g = 20.54 \pm 0.02$, $r = 19.918 \pm 0.018$ и $z = 18.67 \pm 0.02$ для оптического континуального излучения. Эти значения, а также приведённые выше величины J и K , будут использованы ниже (в разд. 2.5) для оценки массы родительской галактики SDSS J230630.38+155620.4.

Светимость континуума на длине волны $5100 \text{ \AA}$ в системе покоя (величина, часто используемая в исследованиях галактик и АЯГ), усреднённая по пяти спектральным интервалам вокруг этой длины волны, составляет $\lambda L_\lambda = (9.9 \pm 0.7) \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$. В итоге, исходя из совокупности свойств оптических линий и континуума в сочетании с высокой болометрической светимостью SRGA J2306+1556=SDSS J230630.38+155620.4 (см. ниже), можно уверенно классифицировать объект как квазар 2-го типа.

Когда мы завершали работу [92], вышел первый выпуск данных инструмента Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI DR1) [115]. В нём представлен новый спектр SDSS J230630.38+155620.4, полученный 3 ноября 2021 года (с экспозицией 1360 s), т.е. примерно через девять лет после наблюдения SDSS. Этот спектр показан на нижней панели рис. 2.7. DESI [116] установлен на 4-м телескопе и использует три спектральные камеры, работающие в полосах B , R и Z и покрывающие диапазон длин волн $3600\text{--}9800 \text{ \AA}$; спектральное разрешение ($\lambda/\Delta\lambda$) варьируется примерно от 2000 до 5000 в зависимости от длины волны, что примерно вдвое лучше, чем у SDSS.

Потоки эмиссионных линий в спектре SDSS J230630.38+155620.4, полученном в обзоре SDSS, оказались систематически на $\sim 15\%$ выше, чем в спектре DESI, причем соответствующие континуумы демонстрируют такое же смещение на $\sim 15\%$. Это указывает на то, что различие связано с неопределённостью абсолютной калибровки по потоку, а не с переменностью источника. Отсутствие существенной спектральной переменности в оптическом диапазоне на временном масштабе ~ 6 лет в системе покоя неудивительно, учитывая, что SDSS J230630.38+155620.4 – квазар 2-го типа, так что аккреционный диск и область образования широких линий скрыты от нас за газопылевым тором.

Таблица 2.7 — Радиообзоры, обсуждаемые в тексте.

Обзор	Частота, МГц	Угловое разрешение	Период наблюдений	Ссылка
VLSSr	74	80''	2001–07	[118]
TGSS	150	25''	2010–12	[119]
4C	178	3.5'	1960–65	[117]
TXS	365	20''	1974–83	[120]
MRC	408	3'	1968–78	[121]
RACS	887.5	15''	2019	[77]
NVSS	1400	45''	1993–97	[76]
VLA	3000	2.5''	2017–23	[75]
87GB	4850	3.5'	1987	[122]
GB6	4850	3.5'	1986–87	[123]

2.3.2 Радионаблюдения

Оказалось, что SRGA J2306+1556 = SDSS J230630.38+155620.4 уже давно известен как радиоисточник (ключевые характеристики обсуждаемых ниже обзоров приведены в табл. 2.7). Источник, расположенный примерно в 156'' от оптического положения квазара, впервые был обнаружен в Кембриджском обзоре 4C на частоте 178 MHz [117]. Измеренная плотность потока составила 2.2 Ян. Недавние наблюдения с лучшим угловым разрешением выявили вблизи SRGA J2306+1556 двойной радиоисточник на 74 МГц (обзор VLSSr, [118], см. рис. 2.9, верхняя панель¹¹) и 150 МГц (обзор TGSS, [119]). Яркие компоненты имеют почти равные плотности потока: 3.02 ± 0.41 и 2.79 ± 0.39 Jy на 74 МГц; 1.51 ± 0.15 и 1.32 ± 0.13 Ян на 150 МГц у северного и южного компонентов соответственно. Соответствующие спектральные индексы этих компонентов $\alpha_{74-150} = -0.98 \pm 0.24$ и -1.06 ± 0.24 , что указывает на оптически тонкое синхротронное излучение со спектральным старением. Обзор RACS (887.5 МГц) также демонстрирует двойную радиоструктуру объекта с суммарной плотностью потока около 640 мЯн и двумя ярчайшими гауссовыми компонентами по 137 и 120 мЯн [77].

¹¹Радиокарта взята с <https://www.cv.nrao.edu/vlss/VLSSpostage.shtml>

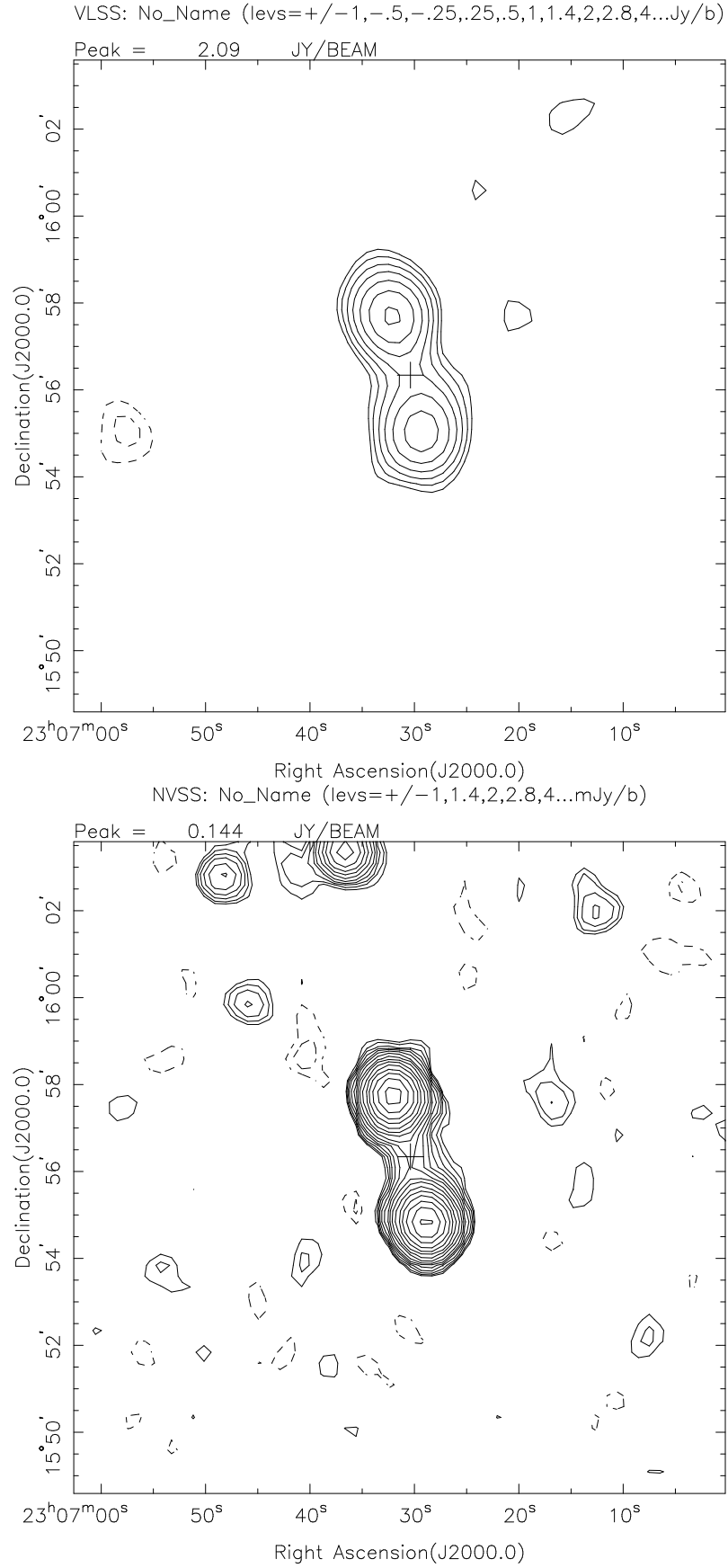


Рисунок 2.9 — Радиокарты SRGA J2306+1556 на 74 МГц (VLSSr, верхняя панель) и 1400 МГц (NVSS, нижняя панель). Крест указывает положение оптического компаньона SRGA J2306+1556.

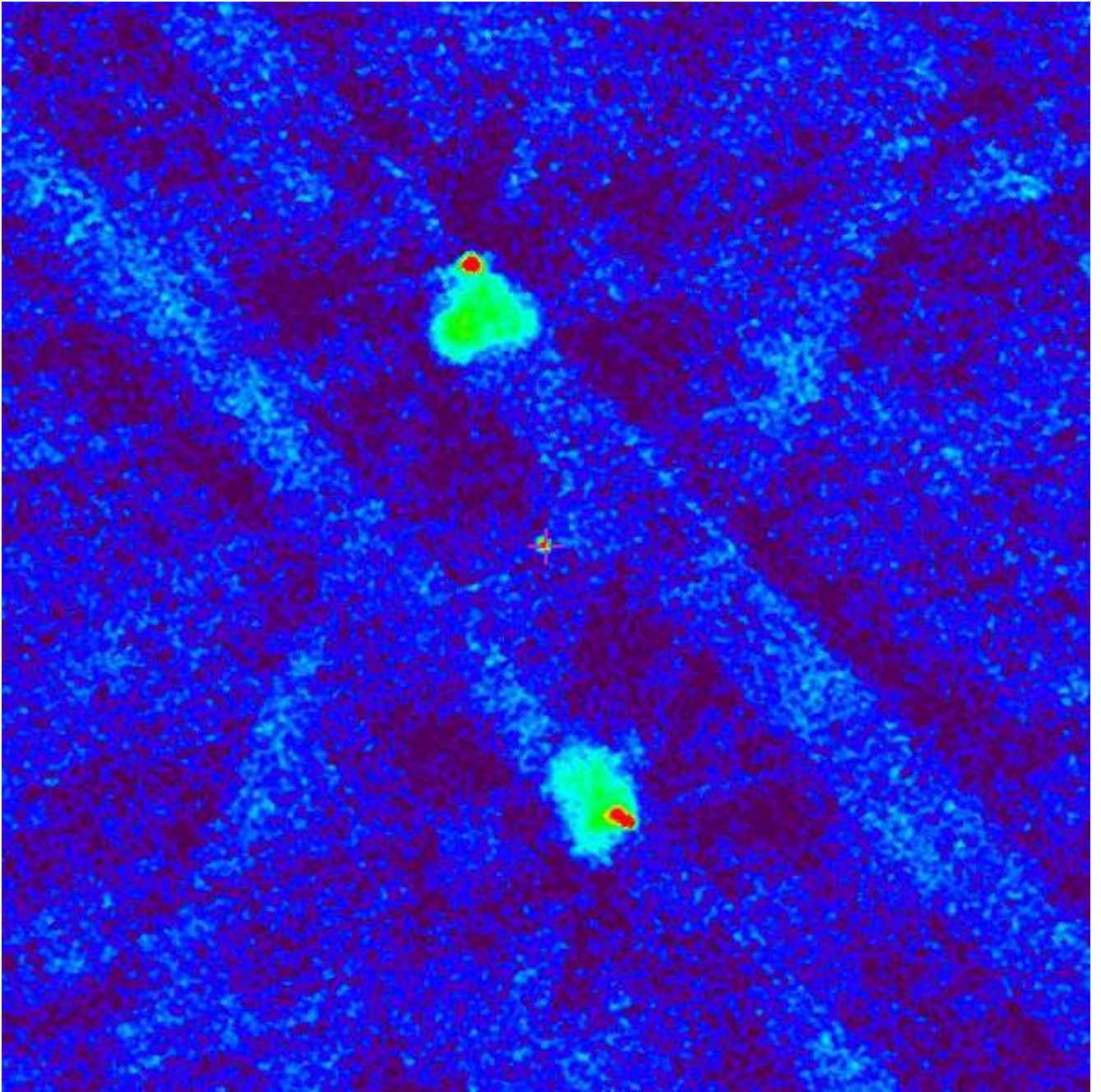


Рисунок 2.10 — Радиоизображение SRGA J2306+1556 на 3000 МГц (поле $6.5'$ по стороне), полученное медианным сложением Quick Look-изображений из трёх эпох VLASS. Красный крест указывает положение оптического компаньона SRGA J2306+1556. Северный (красная точка в верхней части изображения) и южный (две красные точки в нижней части изображения) компоненты являются горячими пятнами (hotspots) в протяжённых радиодолях (обозначены зелёным цветом).

Морфология NVSS на 1400 МГц показывает два ярких компонента (рис. 2.9, нижняя панель¹²) с примерно равными плотностями потока у северного и южного компонентов: 215 ± 8 и 193 ± 7 мЯн соответственно [76]. Однако имеется и слабый центральный компонент (14 ± 1 мЯн) на расстоянии $5''$ от SDSS J230630.38+155620.4. Тройственная морфология с центральным компонентом (≈ 5 мЯн) подтверждается на 3000 МГц данными обзора Very Large Array Sky Survey (VLASS) (рис. 2.10, [75]). Этот центральный компонент совпадает с оптическим положением квазара с точностью до $0.3''$. Центральный компонент не демонстрирует переменности по данным VLASS: 4.81 ± 0.28 мЯн (Эпоха 1, октябрь 2017 года) и 4.64 ± 0.39 мЯн (Эпоха 2, август 2020 года). Северный компонент (N) имеет плотность потока 20.47 ± 0.69 мЯн в Эпоху 1 и 25.90 ± 1.12 мЯн в эпоху 2. Южный компонент (S) выглядит двойным: 13.00 ± 0.26 мЯн (S_a) и 11.88 ± 0.66 мЯн (S_b) в эпоху 1 (расстояние между этими подкомпонентами $4.7''$); 12.81 ± 0.36 мЯн (S_a) и 9.69 ± 0.82 мЯн (S_b) в эпоху 2. Область около SRGA J2306+1556 также наблюдалась в ходе эпохи 3 обзора VLASS в январе 2023 года, однако каталог радиоисточников для эпохи 3 пока недоступен.

На ещё более высоких частотах имеются лишь отдельные измерения на 4.85 ГГц, выполненные на 91-м радиотелескопе Грин-Бэнк в 1986–87 гг. [122–124]. Однако эти наблюдения проводились с угловым разрешением $3.5'$, и радиоисточник не был разрешён; суммарная плотность потока составила около 110 мЯн.

На рис. 2.11 представлены спектры северного, южного и центрального компонентов, а также суммарный спектр радиокомпаньона SRGA J2306+1556. Суммарный спектр хорошо описывается крутым степенным законом $F_\nu \sim \nu^\alpha$ с $\alpha \approx -1$, несмотря на то, что измерения выполнялись на протяжении 55 лет. Это указывает на отсутствие сильной переменности источника в радиодиапазоне.

Исключением из этого степенного закона является суммарная измеренная плотность потока 50–55 мЯн на 3 ГГц: это существенно меньше ожидаемой величины порядка 200 мЯн, вытекающей из крутого степенного спектра, полученного по измерениям на более низких и более высоких частотах. Эту проблему можно решить, учитывая наличие диффузного радиоизлучения на 3 ГГц. VLASS обладает самым высоким угловым разрешением среди обсуждаемых радиообзоров и регистрирует лишь самые яркие компоненты с высоким

¹²Радиокарта взята с <https://www.cv.nrao.edu/nvss/postage.shtml>

отношением сигнал/шум. Значительная доля радиоизлучения на 3 ГГц распределена по области, превышающей размер луча VLASS. Оценим грубо возможный вклад диффузной составляющей в суммарную плотность потока. RMS-чувствительность на эпоху для VLASS составляет около 0.12 мЯн/beam, а размер луча – около 3". Расстояние между северным (N) и южным (S) компонентами VLASS составляет примерно 210", и RMS равен 147 мЯн на окружность радиусом 105". Складывая плотность потока трёх VLASS-компонент и это RMS-значение, получаем верхний предел порядка 200 мЯн для суммарной плотности потока на 3 ГГц. Далее предположим, что протяжённая морфология на 3 ГГц гантелевидная, как на 1.4 ГГц. Тогда компоненты N и S можно рассматривать как окружности радиусом $r = xR$, где $R = 105''$ – угловое расстояние от каждого из этих компонент до центрального. Вероятно, $x = 0.6\text{--}0.8$, поэтому $r = 63\text{--}84''$. RMS составляет около 53 мЯн на окружность радиусом 63", тогда как RMS для перемычки между окружностями N и S – около 24 мЯн при $r = 63''$. В сумме получаем RMS порядка 130 мЯн для площади радиоисточника. Следовательно, верхний предел для суммарной плотности потока в рассматриваемом случае составляет около 180 мЯн, что удовлетворительно согласуется со степенным спектром, показанным на рис. 2.11.

Можно предположить, что компоненты N и S в VLASS являются горячими пятнами. Это подтверждается интерактивным радиоизображением, полученным медианным сложением Quick Look-изображений из всех трёх эпох VLASS¹³ для области, центрированной на SDSS J230630.38+155620.4 (рис. 2.10). Это суммарное изображение демонстрирует наличие радиодолей, не обнаруживаемых в отдельных эпохах.

Вклад радиоядра можно охарактеризовать как отношение плотности потока центрального компонента к полной: $C_v = S_{v,c}/S_{v,\text{total}}$. Мы оцениваем $C_{1.4\text{ GHz}} = 0.032 \pm 0.04$ и $C_{3.0\text{ GHz}} = 0.025 \pm 0.001$ (если принять $S_{3.0,\text{total}} = 180 \div 200$ мЯн), таким образом, вклад радиоядра не становится более значительным на более высоких частотах.

Расстояние между центрами симметричных компонент в картинной плоскости составляет около 0.9 Мпк по данным VLSSr и TGSS и 1.0 Мпк по данным NVSS (на красном смещении $z = 0.4389$). Проекционное расстояние между компонентами VLASS равно 1.2 Мпк, что подтверждает то, что это горячие пятна. Центральный компонент VLASS имеет исправленный за

¹³Взято с https://archive-new.nrao.edu/vlass/HiPS/All_VLASS/Quicklook

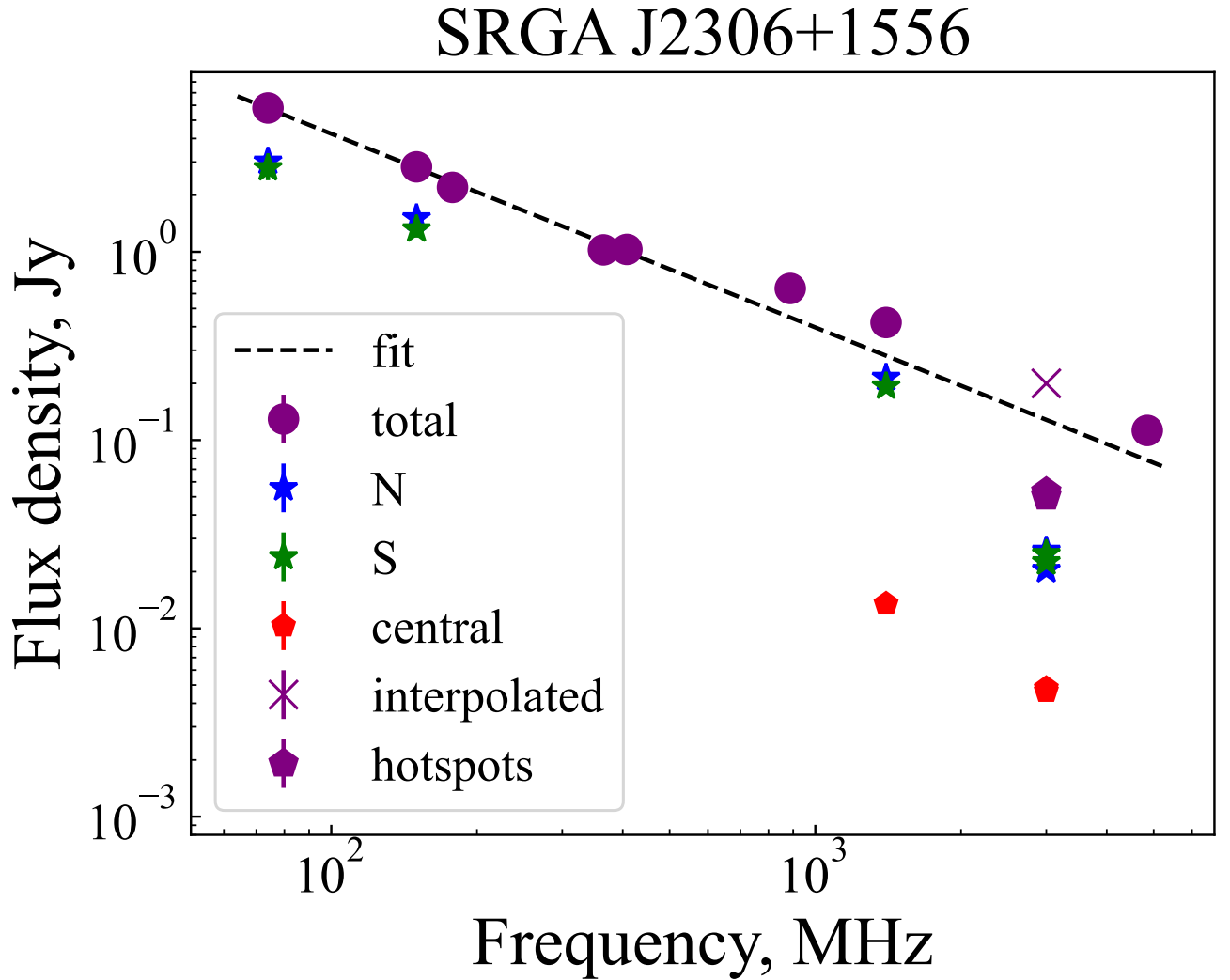


Рисунок 2.11 — Широкополосный спектр радиокompаньона SRGA J2306+1556. Фиолетовые кружки обозначают суммарную плотность потока всех компонент; синие и зелёные звёздочки — плотность потока северного и южного компонентом соответственно; красные пятиугольники показывают плотность потока центрального компонента. Фиолетовый крест указывает интерполированную плотность потока на 3000 МГц по измерениям в диапазоне 888–4850 МГц. Фиолетовые пятиугольники обозначают плотность потока горячих пятен на 3000 МГц. Пунктирная линия представляет степенную модель $F_\nu \sim \nu^{-1}$ для суммарной плотности потока.

свертку размер $\leq 0.9 \times 0.5''$ (проецированный размер $\leq 5 \times 3$ кпк), что указывает на его связь с центральной областью родительской галактики квазара. Эти оценки свидетельствуют, что радиоккомпаньон SRGA J2306+1556 является гигантской радиогалактикой. Её радиосветимость составляет $P_{1400\text{ MHz}} = 2.86 \times 10^{26} \text{ Вт Гц}^{-1}$, что эквивалентно $\nu L_\nu = 4 \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$. Высокая радиосветимость и обсуждавшиеся выше морфологические особенности на 3 ГГц означают, что эта гигантская радиогалактика относится ко второму типу по классификации Фанарова и Райли (FR II). Наш вывод о природе радиоккомпаньона SRGA J230631.0+155633 подтверждает результаты недавней работы [125], где независимо сообщалось об открытии J2306+1556 как гигантского радиоквара среди 34 новых гигантских радиоисточников по данным TGSS.

2.4 Спектральное распределение энергии

Мы построили широкополосное спектральное распределение энергии (СПЭ) SRGA J2306+1556 от радиодиапазона до рентгеновского диапазона энергий (рис. 2.12). Предположительно, в радиодиапазоне наблюдается синхротронное излучение джетов и долей, в инфракрасном – излучение аккреционного диска, переработанное пылевым тором, оптическое излучение преимущественно исходит от родительской галактики, а рентгеновское рождается в горячей короне аккреционного диска.

В радиодиапазоне мы использовали измерения суммарного потока в наблюдаемом диапазоне 74.0–4850 МГц, исключив измерение VLASS на 3 ГГц с высоким угловым разрешением, поскольку оно занижает диффузное радиоизлучение (см. разд. 2.3.2). Для оптического и инфракрасного диапазонов мы использовали фотометрию из DESI LS DR10 (*grz*, *W1*, *W2*, *W3*, *W4*) и UKIRT HS DR2 (*JK*), исправленную за поглощение в Галактике (см. разд. 2.3.1). Вклад эмиссионных линий не вычитался. В рентгеновском диапазоне (0.3–20 кэВ в системе наблюдателя, что соответствует 0.4–29 кэВ в системе покоя) для низкого состояния источника мы использовали степенную модель спектра со свободным наклоном (см. табл. 2.2), исправленную на галактическое и внутреннее поглощение, и оценили соответствующие доверительные интервалы с помощью марковских цепей Монте-Карло (алгоритм Гудмана—Уира) с 30 ходами и

общим числом 600 000 шагов. Для высокого состояния (для которого у нас нет рентгеновской спектральной информации) мы предположили ту же форму спектра, что и для низкого состояния, и дополнительно учли неопределённость измерения потока.

Интересно сравнить СРЭ SRGA J2306+1556 с композитными СРЭ радиогромких и радиотихих квазаров 1-го типа из [126], охватывающими диапазон от 2.45 м в системе покоя (радио) до 11.6 кэВ (рентген). Эти шаблоны получены усреднением СРЭ множества объектов и, следовательно, репрезентативны для соответствующих популяций (хотя имеется существенный разброс от объекта к объекту). Исследуемый нами объект – квазар 2-го типа, собственное излучение которого от близкого ИК до мягкого рентгеновского диапазона, как ожидается, почти полностью поглощено пылевым тором. Поэтому мы нормируем шаблоны [126] на плотность светимости SRGA J2306+1556 в полосе $W4$, т.е. на длине волны $15\text{ }\mu\text{м}$ в системе покоя квазара, где тор, вероятно, является оптически тонким для собственного излучения, так что наблюдаемая светимость должна слабо зависеть от угла зрения. Из рис. 2.12 ясно видно, что SRGA J2306+1556 – радиогромкий квазар, поскольку вклад радиоизлучения в болометрическую светимость намного ближе к шаблону радиогромких квазаров, чем к шаблону радиотихих.

Мы можем оценить внутреннюю болометрическую светимость SRGA J2306+1556, проинтегрировав шаблон СРЭ радиогромких квазаров 1-го типа. Поскольку ИК ‘горб’ (с максимумом в районе $15\text{ }\mu\text{м}$) связан с переработанным оптическим–ультрафиолетовым излучением аккреционного диска и мягким рентгеновским излучением его горячей короны, разумно интегрировать СРЭ только на длинах волн короче $1\text{ }\mu\text{м}$. Основной вклад обеспечивает ультрафиолетовый избыток (‘Big Blue Bump’, BBV) в диапазоне $1\text{ }\mu\text{м} - 1\text{ кэВ}$: $L_{\text{BBV}} = 5 \times 10^{46}\text{ эрг с}^{-1}$ (включая существенный вклад линий излучения), а рентгеновская компонента (1–11.6 кэВ) даёт дополнительный, меньший вклад $2.6 \times 10^{45}\text{ эрг с}^{-1}$. Для сравнения, интегрирование радиогромкого шаблона по ИК диапазону, то есть по длинам волн $> 1\text{ }\mu\text{м}$, даёт $L_{>1\text{ }\mu\text{м}} = 2.1 \times 10^{46}\text{ эрг с}^{-1}$, т.е. $\sim 40\%$ светимости BBV, что, вероятно, отражает телесный угол, в котором тор перекрывает излучение аккреционного диска.

Фактически измеренная непоглощенная светимость SRGA J2306+1556 в диапазоне 2–10 кэВ составляет $L_{\text{X}} = 1.0^{+0.8}_{-0.3} \times 10^{45}$ и $6^{+6}_{-3} \times 10^{45}\text{ эрг с}^{-1}$ в низком и высоком рентгеновском состоянии квазара соответственно.

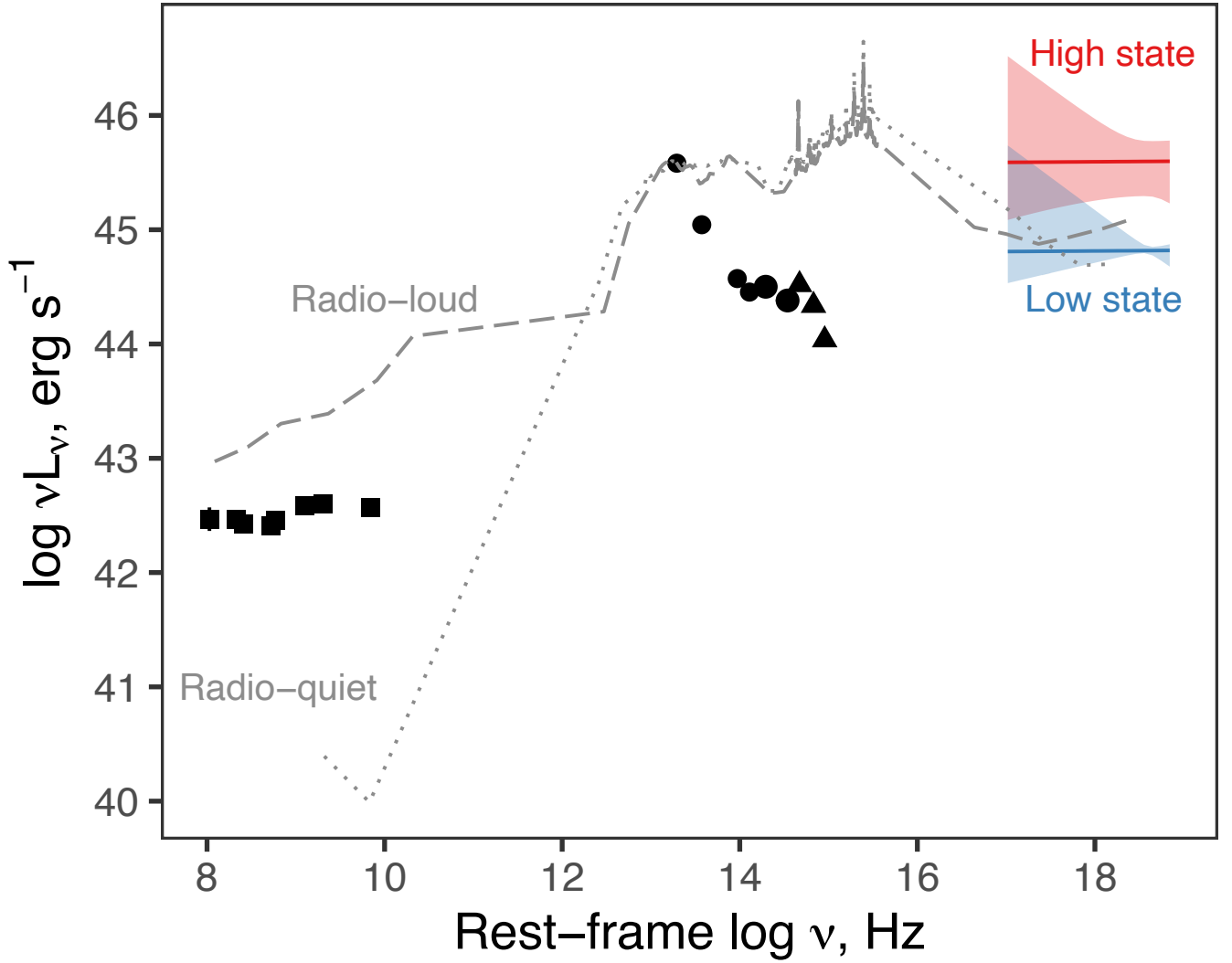


Рисунок 2.12 — Спектральное распределение энергии SRGA J2306+1556. Квадраты, кружки и треугольники показывают соответственно радионаблюдения (74.0–4850 МГц), ИК-данные ($W1$, $W2$, $W3$, $W4$, J , K) и оптические измерения (grz), исправленные за поглощение в Галактике и пересчитанные во внутренние плотности светимости. В рентгеновском диапазоне (0.4–29 кэВ в системе покоя квазара) синие и красные сплошные линии показывают внутреннюю степенную компоненту для ‘низкого’ и ‘высокого’ состояний источника, а окружающие заштрихованные области отражают доверительные интервалы 1σ . Точечная и штриховая линии показывают шаблоны спектров квазаров 1-го типа: радиотихого и радиогромкого из [126], нормированные по измерению $W4$. Оптические и инфракрасные фотометрические точки, кроме $W4$, лежат существенно ниже шаблонов, поскольку непрерывное излучение SRGA J2306+1556 сильно поглощается пылевым тором, как и ожидается для квазара 2-го типа, тогда как шаблоны соответствуют непоглощенным квазарам 1-го типа.

Предполагая степенной закон с $\Gamma = 1.8$ и экспоненциальный завал на энергии $E_{\text{cut}} = 150$ кэВ, что характерно для АЯГ [82; 127], можно оценить суммарную светимость рентгеновского континуума в диапазоне 1–1000 кэВ (L_{HX}) как $\sim 4 \times 10^{45}$ и $\sim 2 \times 10^{46}$ эрг с $^{-1}$ для низкого и высокого состояний соответственно. Следовательно, более реалистичная оценка болометрической светимости квазара составляет $L_{\text{bol}} = L_{\text{BVB}} + L_{\text{HX}} \sim 5.4 \times 10^{46}$ и $\sim 7 \times 10^{46}$ эрг с $^{-1}$ для низкого и высокого состояний соответственно, а соответствующие отношения $L_{\text{HX}}/L_{\text{bol}} \sim 0.07$ и ~ 0.3 . Для сравнения, суммарное излучение всех квазаров во Вселенной характеризуется средним значением $L_{\text{HX}}/L_{\text{bol}} \sim 0.13$ [3]. Пренебрегая неопределённостями, низкое и высокое состояния SRGA J2306+1556 можно, таким образом, считать ‘рентгеновски тусклым’ и ‘рентгеновски ярким’, соответственно. Однако нельзя исключать, что УФ светимость, о которой у нас нет прямых сведений, также увеличилась во время рентгеновской вспышки.

Хотя представленные здесь рентгеновские наблюдения показали, что SRGA J2306+1556 существенно переменен на масштабах в несколько лет, его типичный уровень активности на гораздо больших масштабах можно оценить по излучению области образования узких линий (Narrow Line Region, NLR), характерный размер которой может достигать нескольких килопарсек. Используя измеренный поток в линии [OIII] λ 5007 и соответствующую поправку на внутреннее поглощение, определённую в разд. 2.3.1, мы оцениваем светимость в этой линии как $L_{\text{O[III]}} = (3.2 \pm 0.3) \times 10^{43}$ эрг с $^{-1}$. Соответствующее отношение к светимости в диапазоне 2–10 кэВ составляет $L_{\text{O[III]}}/L_{\text{X}} \approx 0.03 \pm 0.02$ и $L_{\text{O[III]}}/L_{\text{X}} \approx 0.005 \pm 0.004$ для низкого и высокого рентгеновских состояний соответственно. Это можно сравнить с типичным значением ~ 0.01 для АЯГ (например, [128]), что указывает на то, что SRGA J2306+1556 в течение последних нескольких тысяч лет находился в среднем примерно на таком же уровне активности (т.е. аккреции), на каком мы он был обнаружен в ходе наших рентгеновских наблюдений.

По доступным измерениям в наблюдаемом диапазоне 74–4850 МГц мы можем оценить светимость SRGA J2306+1556 в радиодиапазоне (106–6980 МГц в системе покоя): $L_{\text{radio}} \approx 2.3 \times 10^{43}$ эрг с $^{-1}$, так что $L_{\text{radio}}/L_{\text{bol}} \approx 4 \times 10^{-4}$. Для сравнения, для композитных СРЭ радиогромких и радиотихих квазаров из [126], начинающихся на частотах 122 МГц и 2100 МГц соответственно, мы получаем $L_{\text{radio}}/L_{\text{bol}} \approx 4 \times 10^{-3}$ и 8×10^{-7} (соответствующие болометрические светимости оценивались как $5 \lambda L_{\lambda}(3000\text{\AA})$, следуя [126]). Это ещё раз свиде-

тельствует, что SRGA J2306+1556 является радиогромким квазаром. Наконец, отметим, что гигантские радиодоли, наблюдаемые вокруг галактик типа FR II, имеют характерные оценки возрастов $\sim 10^8$ лет (например, [129]); следовательно, наличие аналогичных структур у SRGA J2306+1556 указывает на то, что существенная активность центральной СМЧД в этой галактике поддерживалась по крайней мере на сопоставимом временном масштабе.

2.5 Родительская галактика и центральная черная дыра

Поскольку SRGA J2306+1556 является квазаром 2-го типа, разумно предположить, что основной вклад в СРЭ в оптическом и, возможно, в ближнем ИК (БИК) диапазонах вносит излучение родительской галактики. Это позволяет оценить массу ее звёздного населения. С этой целью мы следовали методикам, изложенным в [130]. А именно, мы моделировали СРЭ с помощью байесовского кода Prospector [131], в котором используется библиотека Flexible Stellar Population Synthesis (FSPS) [132] для генерации синтетических моделей звёздных популяций. Мы использовали оптическую фотометрию из DESI LS DR10, из которой был вычтен вклад эмиссионных линий (предположительно испускаемых активным ядром), и БИК фотометрию из UHS DR2; все данные были исправлены за поглощение в Галактике, как описано в разд. 2.3.1.

Параметры наилучшей подгонки приведены в табл. 2.8, где M_{gal} – полная звёздная масса родительской галактики, $u - r$ – синтетический цвет в системе покоя квазара, исправленный за поглощение в Галактике, τ_{SFH} – характеристическая (e-folding) временная шкала истории звездообразования, t_{age} – средний возраст звёзд, Z – металличность звезд, $E(B - V)$ – покраснение на пыли внутри родительской галактики. Как видно из рис. 2.13, оптические–БИК данные хорошо описываются этой моделью, тогда как СИК часть СРЭ, не использованная в анализе, значительно превышает экстраполяцию наилучшей модели. Этот избыток вероятно связан с излучением горячей пыли в торе АЯГ.

Оказалось, что звёздное население очень старое: средний возраст звёзд $13.2^{+0.5}_{-1.1} 10^9$ лет формально превышает возраст Вселенной ($9.1 10^9$ лет) при $z = 0.4389$. Вероятно, это указывает на более сложную историю звездообразования в галактике, чем предполагается в нашей (экспоненциальной) модели.

Таблица 2.8 — Свойства родительской галактики, определённые с помощью моделирования СРЭ в оптическом и близком ИК диапазонах.

$\log M_{\text{gal}},$ $M_{\odot}$	$u - r$ mag	τ_{SFH}	t_{age} 10^9 лет	$\log Z$ $Z_{\odot}$	$E(B - V)$ mag
$11.39^{+0.03}_{-0.02}$	$1.61^{+0.06}_{-0.06}$	$5.78^{+1.16}_{-0.88}$	$13.18^{+0.47}_{-1.08}$	$0.48^{+0.02}_{-0.04}$	$0.19^{+0.03}_{-0.07}$

Неопределённости параметров приведены на уровне достоверности 1σ .

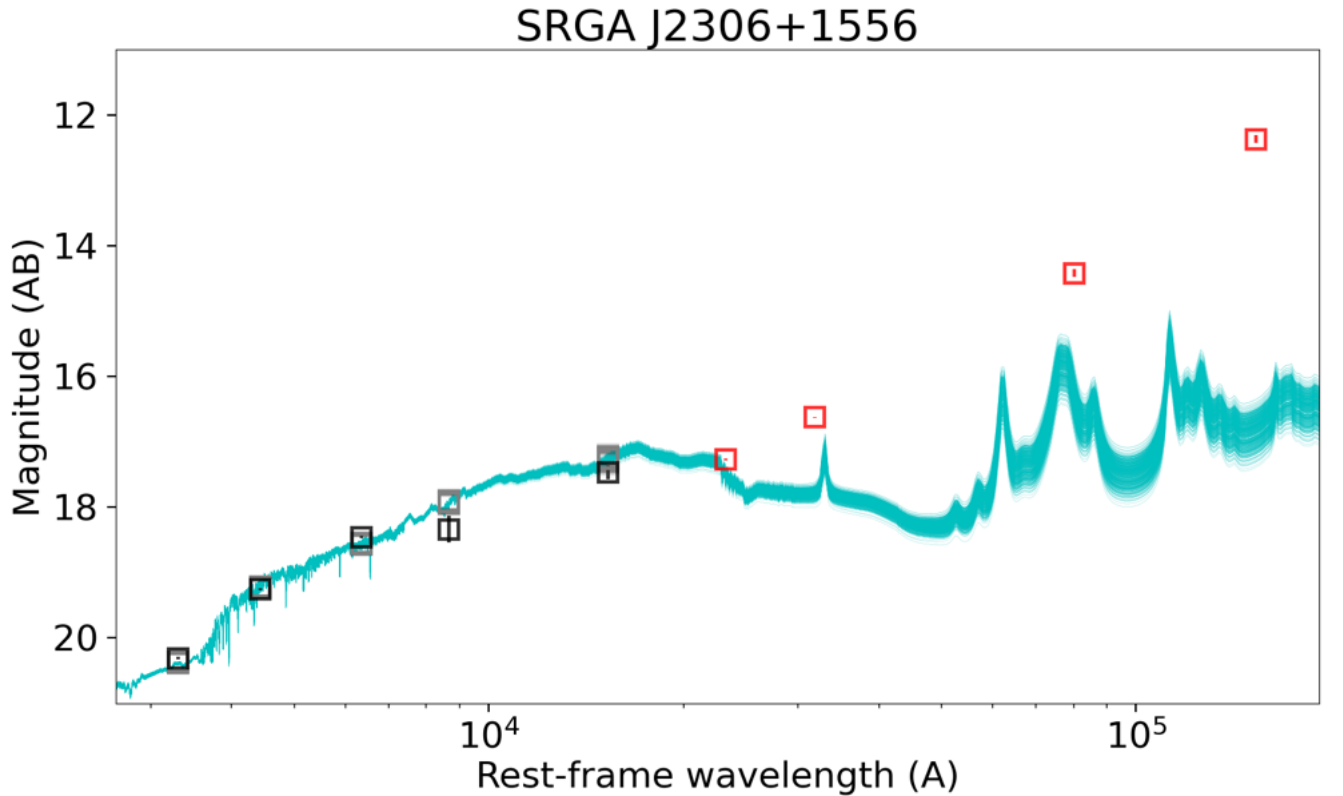


Рисунок 2.13 — Моделирование СРЭ родительской галактики SRGA J2306+1556. Чёрные квадраты – измеренная оптическая (grz) и БИК (JK) фотометрия, исправленная за поглощение Галактики и за вычетом вклада оптических эмиссионных линий. Серые квадраты показывают наилучшую подгонку этих данных, а синяя область отображает 100 ходовок анализа марковских цепей Монте-Карло. Красные квадраты – СИК фотометрия WISE ($W1$, $W2$, $W3$ и $W4$), которая не использовалась в моделировании, поскольку в этой части спектра, по-видимому, доминирует излучение пылевого тора АЯГ.

Кроме того, возможно, БИК фотометрия все же слегка “загрязнена” излучением активного ядра, переработанным молекулярным газом и горячей пылью. Тем не менее маловероятно, что оценка общей звёздной массы существенно искажена этими систематическими эффектами. Отметим также, что внутреннее покраснение, полученное для родительской галактики, значительно меньше найденного нами для области образования узких линий (NLR) по бальмеровскому декременту (см. разд. 2.3.1). Это указывает на то, что область NLR более пыльная, чем остальная галактика.

Полученные параметры галактики – большая масса и старое звёздное население – указывают, что она является эллиптической или, по крайней мере, в ее морфологии преобладает балдж. Тогда мы можем оценить массу центральной чёрной дыры, M_{BH} , используя известную корреляцию между M_{BH} и массой балджа, M_{bulge} , в локальной Вселенной [133]:

$$\frac{M_{\text{BH}}}{10^9 M_{\odot}} = (0.49^{+0.06}_{-0.05}) \left(\frac{M_{\text{bulge}}}{10^{11} M_{\odot}} \right)^{1.17 \pm 0.08}, \quad (2.11)$$

Подставляя значение M_{gal} из табл. 2.8 вместо M_{bulge} в эту формулу, получаем $M_{\text{BH}} \sim 1.4 \times 10^9 M_{\odot}$ с неопределённостью порядка ~ 2 , главным образом из-за внутреннего разброса в корреляции $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ (0.28 dex, [133]).

Наконец, используя нашу оценку болометрической светимости $L_{\text{bol}} \sim (6 \pm 1) \times 10^{46} \text{ эрг с}^{-1}$, находим, что она составляет $\sim 30\%$ от эддингтоновской светимости для полученной оценки массы чёрной дыры. Следовательно, аккреция происходит в очень высоком темпе.

2.6 SRGA J2306+1556 в контексте населения квазаров

SRGA J2306+1556 представляет собой весьма необычный АЯГ для Вселенной на $z < 0.5$. Во-первых, его внутренняя (т.е. исправленная за поглощение) рентгеновская светимость в наших наблюдениях лежала в пределах $L_{\text{X}} = 1.0^{+0.8}_{-0.3} \times 10^{45} - 6^{+6}_{-3} \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$ (2–10 кэВ), а спектр оказался сильно поглощённым, с $N_{\text{H}} \sim 2 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Такие мощные в рентгене поглощённые АЯГ чрезвычайно редки на малых красных смещениях.

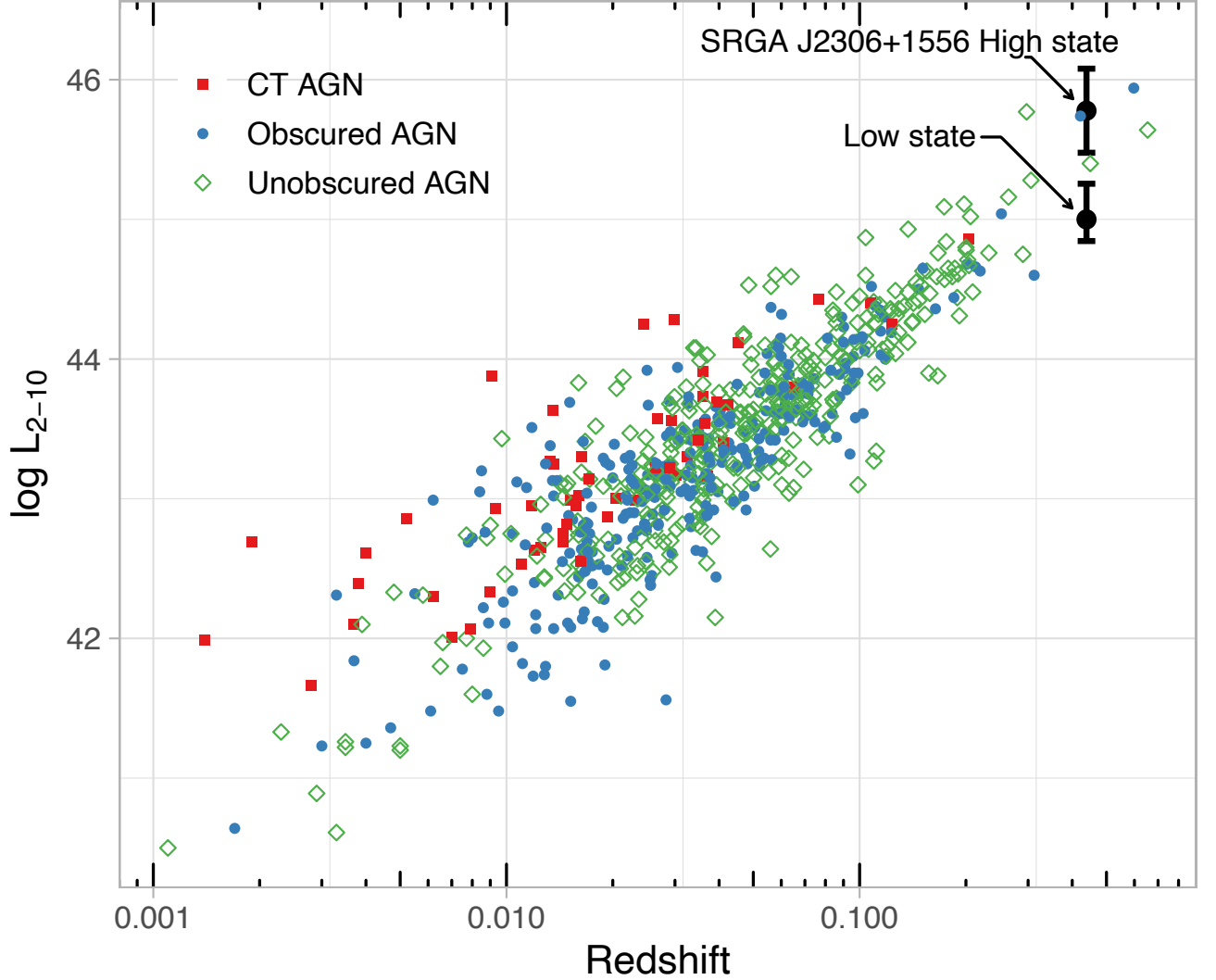


Рисунок 2.14 — Внутренняя светимость в диапазоне 2–10 кэВ в зависимости от красного смещения для АЯГ из 70-месячного каталога *Swift*/BAT, за исключением блазаров. Источники разделены на непоглощённые ($N_{\text{H}} < 10^{22} \text{ см}^{-2}$), поглощённые ($10^{22} < N_{\text{H}} < 10^{24} \text{ см}^{-2}$) и комптоновски толстые ($N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ см}^{-2}$). Соответствующие неопределённости не показаны. Для сравнения показан SRGA J2306+1556 в его низком и высоком состоянии светимости, с соответствующими неопределённостями (см. легенду).

Лучше всего судить об этом по результатам обзоров всего неба в жёстком рентгеновском диапазоне (на энергиях выше 15 кэВ), в котором влияние поглощения минимально, выполненных за последние два десятилетия приборами БАТ на борту обсерватории *Swift* (например, [134]) и IBIS на борту *INTEGRAL* (например, [135]). Благодаря последующим программам рентгеновского и оптического отождествления эти обзоры предоставили статистически полные каталоги АЯГ, отобранных в жёстком рентгеновском диапазоне, с информацией об их красных смещениях, оптических типах и рентгеновских спектральных свойствах. На рис. 2.14 показано расположение объектов из 70-месячного каталога *Swift*/БАТ [82] на диаграмме красное смещение – внутренняя светимость в диапазоне 2–10 кэВ. Блазары были исключены, а все остальные АЯГ были разделены на непоглощённые ($N_{\text{H}} < 10^{22} \text{ см}^{-2}$), поглощённые ($10^{22} < N_{\text{H}} < 10^{24} \text{ см}^{-2}$) и комптоновски толстые ($N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ см}^{-2}$). Внутренние светимости в этом каталоге определялись по широкополосному спектральному анализу данных различных рентгеновских телескопов с использованием той же космологической модели, что и в нашей работе, и с более точными расстояниями для ближайших АЯГ. Для сравнения мы нанесли SRGA J2306+1556 на ту же диаграмму, используя его красное смещение $z = 0.4389$ и наши оценки светимости для низкого и высокого рентгеновских состояний.

В каталоге *Swift*/БАТ всего 11 АЯГ, не являющихся блазарами, со светимостью $L_{\text{X}} > 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$. Их красные смещения варьируются от 0.1735 до 0.6540, и лишь три из них являются поглощёнными: Swift J0952.3–6234 ($z = 0.252$, $L_{\text{X}} \approx 1.1 \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$, $N_{\text{H}} \approx 1.2 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$), Swift J0216.3+5128 ($z = 0.422$, $L_{\text{X}} \approx 5.5 \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$, $N_{\text{H}} \approx 2.8 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$) и Swift J2344.6–4246 ($z = 0.5975$, $L_{\text{X}} \approx 8.7 \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$, $N_{\text{H}} \approx 3.3 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$).

Разумеется, обзор всего неба *Swift*/БАТ довольно неглубокий: его чувствительность составляет $1.3 \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1}$ или лучше в диапазоне энергий 14–195 кэВ на 90% неба для 70-месячного обзора [136]. Это, предполагая степенной спектр с $\Gamma = 1.8$ и завалом на $E_{\text{cut}} = 150 \text{ кэВ}$, означает, что квазары с $L_{\text{X}} > 3 \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$ (такие как SRGA J2306+1556 в его высоком состоянии) надёжно обнаруживаются *Swift*/БАТ до $z = 0.336$. Поэтому наличие всего лишь одного такого мощного АЯГ до этого красного смещения в каталоге *Swift*/БАТ (Swift J1822.0+6421, $z = 0.297$, $L_{\text{X}} \approx 5.9 \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$, непоглощённый) означает, что он действительно единственный подобный объект во всей ближней Вселенной.

Помимо своей рентгеновской яркости SRGA J2306+1556 примечателен также тем, что является радиогромким. На основании упомянутых выше морфологических особенностей и радиосветимости его можно классифицировать как гигантскую радиогалактику типа FR II. SRGA J2306+1556 хорошо вписывается в теоретическую картину эволюции двойных внегалактических радиоисточников (например, [137]). В настоящее время мы наблюдаем этот источник на стадии Large Symmetric Objects (LSO), в ходе которой радиоспектр крутой с индексом $\alpha \sim -1$. Предположительно, на этой стадии потери, связанные с обратным комптоновском рассеянием на космическом микроволновом фоне, преобладают над синхротронными.

Помимо рентгеновских обзоров яркие поглощённые квазары могут обнаруживаться и в низкочастотных радиообзорах. Большая выборка галактик типа FR II, отобранных из каталога 3CRR [138] вплоть до $z \sim 2.5$, отнаблюдалась современными рентгеновскими (работающими в мягкой диапозоне) телескопами, например, в работах [139; 140]. Используя данные этой выборки, [141] показали, что яркие радиогалактики с узкими линиями (NLRG), подобные SRGA J2306+1556, довольно часто встречаются при $0.5 < z < 1$. Это согласуется со статистикой АЯГ, полученной по глубоким (узконаправленным, pencil-beam) рентгеновским обзорам, исследующим Вселенную на больших красных смещениях. Измеренная функция рентгеновской светимости АЯГ (XLF) показывает, что пространственная плотность мощных ($L_X \gtrsim 10^{45}$ эрг с⁻¹) квазаров быстро растёт с красным смещением до $z \sim 2$, и что $\sim 20\%$ из них (эта доля имеет тенденцию уменьшаться с ростом светимости) являются поглощёнными (например, [7]).

Таким образом, обнаружение нами мощного поглощённого квазара (или, эквивалентно, радиогалактики с узкими линиями, NLRG) при $z \approx 0.44$ очевидно стало возможным благодаря сочетанию двух обстоятельств: 1) сильной космологической эволюции функции рентгеновской светимости (XLF) и 2) более высокой чувствительности (в отношении умеренно поглощённых АЯГ, $N_H \lesssim 2 \times 10^{23}$ см⁻²) обзора всего неба *CPG/ART-XC* по сравнению с обзорами всего неба *Swift*/BAT и *ИНТЕГРАЛ*/IBIS. Вторым фактором позволил заглянуть дальше во Вселенную и, тем самым, исследовать существенно больший сопутствующий объём, что и привело к обнаружению одного из немногих ярких поглощённых квазаров, существовавших за последние 5 млрд лет.

2.7 Заключение

В заключение, SRGA J2306+1556 – один из ближайших мощных в рентгене поглощённых квазаров, сходный по внутренним свойствам с мощными квазарами и NLRG, которые были распространены на существенно больших красных смещениях. Поэтому он 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, а также продолжение мониторинга в рентгеновском, оптическом, ИК и радиодиапазонах с целью выявления переменности светимости и спектральных характеристик.

Глава 3. Рентгеновские свойства мощного квазара PG 1634+706 на $z=1.337$ по данным обсерваторий СРГ и ХММ им. Ньютона

Данная глава основана на работе 4 из списка публикаций по теме диссертации.

3.1 Введение

Активные ядра галактик излучают во всём диапазоне электромагнитных волн – от радиочастот до гамма-лучей. Считается, что основное рентгеновское излучение АЯГ возникает в горячем, оптически тонком слое плазмы (короне) над аккреционным диском, где ультрафиолетовые фотоны диска при многократных рассеяниях на высокоэнергичных электронах “поднимаются” до рентгеновского диапазона энергий. Кроме первичного континуума в спектре обычно присутствует дополнительная компонента, связанная с отражением рентгеновских фотонов от поверхности диска и от окружающего газопылевого тора (см. обзор [96]). По оценкам, вклад рентгеновского излучения в болометрическую светимость АЯГ достигает $\sim 10\%$ [3; 66; 126; 142; 143]. Это делает рентгеновские наблюдения одним из ключевых инструментов для изучения физики аккреции на сверхмассивные чёрные дыры.

По данным космических рентгеновских обсерваторий детально изучены спектры большого количества сейфертовских галактик – активных ядер сравнительно небольшой светимости ($L_X \lesssim 10^{44}$ эрг/с в 2–10 кэВ), находящихся на красных смещениях до ~ 0.1 [82; 144]. Для таких объектов, как правило, характерны относительно малые массы центральных чёрных дыр ($M_{\text{BH}} \lesssim 10^9 M_\odot$) и умеренные темпы аккреции — ниже 10% от эддингтоновского предела [68; 145; 146]. Поскольку свойства аккреционного диска и короны чувствительны и к массе чёрной дыры, и к скорости аккреции [147], необходимо изучать не только сейферты, но и АЯГ с более массивными чёрными дырами и/или с повышенными эддингтоновскими отношениями. Отдельного внимания заслуживают сейфертовские галактики первого типа с узкими эмиссионными линиями (narrow-line Seyfert 1): при сравнительно маломассивных черных

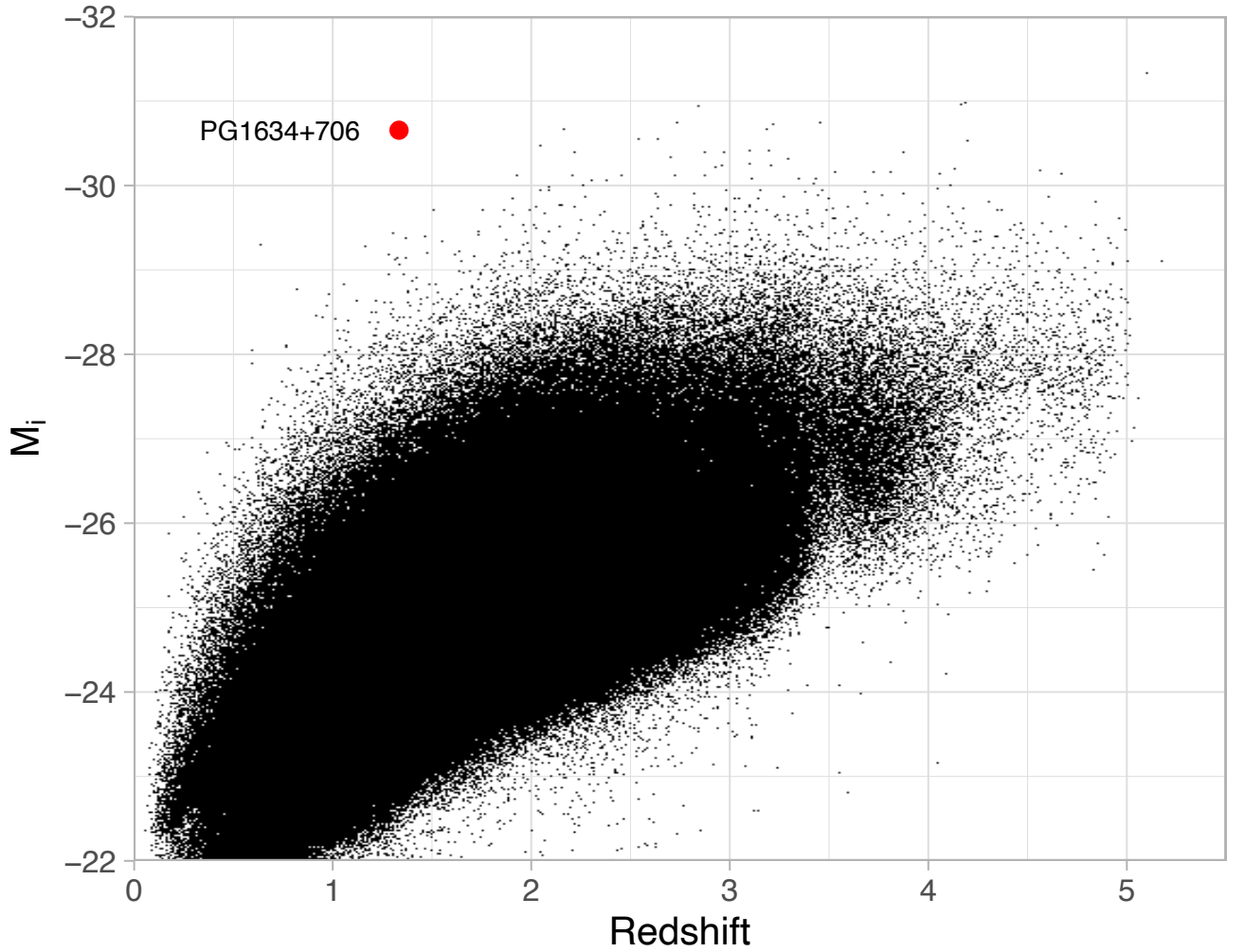


Рисунок 3.1 — Положение квазара PG 1634+706 (выделен красным) на диаграмме «красное смещение – абсолютная звёздная величина M_i (принята К-поправка для $z = 2$)». Для сравнения черной россыпью показаны квазары из 16-го выпуска каталога SDSS (DR16v4, [149]). Светимость PG 1634+706 принята равной $M_i = -30.65$; это значение получено по формуле (4) из [150] на основе монохроматической светимости при $2500 \text{ \AA}$ из табл. 2 работы [151]. Отметим, что PG 1634+706 отсутствует в DR16v4, поскольку эта область неба не была охвачена спектроскопической программой SDSS.

дырах в них часто наблюдаются темпы аккреции, близкие к критическим, а рентгеновские спектры, как правило, оказываются относительно мягкими [148].

Квазары с предельно высокой светимостью ($L_X \gtrsim 10^{46} \text{ эрг с}^{-1}$) представляют особый интерес, поскольку аккреция в них, вероятно, протекает вблизи эддингтоновского предела при массах чёрных дыр $M_{\text{ВН}} \gtrsim 10^9 M_\odot$. Подобные источники встречаются крайне редко; даже самые «близкие» из них расположены на больших космологических расстояниях, что серьёзно осложняет

их рентгеновскую спектроскопию. На фоне редких сверхярких квазаров выделяется PG 1634+706: объект расположен на умеренном красном смещении $z = 1.337$ [152] (см. рис. 3.1). Он был включен в каталог Palomar–Green по критерию ультрафиолетового избытка [153]. Его рентгеновское излучение впервые зафиксировала орбитальная обсерватория *Einstein* [154]. С тех пор источник многократно целенаправленно наблюдали в рентгене различными инструментами, и накопленные данные позволили подробно охарактеризовать его спектральные свойства и переменность. По современным оценкам, PG 1634+706 относится к числу наиболее мощных источников: рентгеновская светимость составляет $L_X \sim 10^{46}$ эрг с⁻¹, а болометрическая – $\sim 10^{48}$ эрг с⁻¹ [151]¹. Масса центральной чёрной дыры по ширине и светимости линии H β оценивается как $\sim 10^{10} M_\odot$, а режим аккреции как близкий к эддингтоновскому [156].

Осенью 2019 года для PG 1634+706 была проведена согласованная серия рентгеновских наблюдений тремя инструментами: *eROSITA* и *ART-XC* им. М.Н. Павлинского на борту *СПГ*, а также камерой EPN обсерватории *ХММ-Newton* [157]. Наблюдения *СПГ* выполнялись в рамках калибровочно-проверочного этапа миссии, во время перелета аппарата в область точки либрации L2 системы Солнце–Земля (июль–декабрь 2019 года) и включали несколько сеансов. Даты наблюдений *ХММ-Newton* были выбраны так, чтобы они почти совпадали по времени с сеансами *СПГ*. Совокупный массив данных позволил с высокой точностью охарактеризовать рентгеновский спектр PG 1634+706 и оценить переменность этого квазара. Ниже приведены основные результаты анализа.

Аналогично предыдущим главам, в дальнейшем используется космологическая модель Λ CDM с параметрами $H_0 = 70$ км/с/Мпк и $\Omega_\Lambda = 0.7$.

3.2 Наблюдения и анализ данных

Исходный набор данных для этой работы включает семь наблюдений, проведенных осенью 2019 года (см. табл. 3.1): четыре сеанса обсерватории *СПГ* и три – обсерватории *ХММ-Newton*. Во всех наблюдениях *СПГ* квазар

¹В [151] приведена светимость при 2500 Å, $\lambda L_{\lambda,2500} \sim 3 \times 10^{47}$ эрг с⁻¹; типичная болометрическая поправка для квазаров — около ~ 3 [155].

Таблица 3.1 — Перечень рентгеновских наблюдений PG 1634+706 за 2019 год.

Период наблюдений	Обсерватория	Телескопы, приборы	Экспозиция, кс
2019-09-29 21:38 – 09-30 13:05	<i>CPG</i>	<i>ART-XC</i> , <i>eROSITA</i> (TM6)	48.3, 55.0
2019-10-20 14:42 – 10-21 01:52	<i>CPG</i>	<i>ART-XC</i> , <i>eROSITA</i> (TM1-7)	37.7, 39.0
2019-10-25 18:02 – 10-26 00:58	<i>XMM-Newton</i>	EPIC-PN	14.4
2019-11-23 09:11 – 20:18	<i>CPG</i>	<i>ART-XC</i> , <i>eROSITA</i> (TM1-7)	37.0, 38.3
2019-11-24 14:38 – 19:54	<i>XMM-Newton</i>	EPIC-PN	12.7
2019-11-26 07:05 – 18:14	<i>CPG</i>	<i>eROSITA</i> (TM1-7)	39.8
2019-11-26 14:32 – 22:19	<i>XMM-Newton</i>	EPIC-PN	17.3

В первой колонке приведены всемирные времена начала и окончания наблюдений. Во второй и третьей указаны названия обсерваторий, телескопов и приборов; для телескопа *eROSITA* в скобках обозначены включенные камеры. Последняя колонка содержит эффективное время экспозиции, скорректированное с учётом виньетирования.

PG 1634+706 наблюдался в пределах $13'$ от оптической оси телескопа *eROSITA*. Наблюдения *XMM-Newton* планировались почти синхронно с *CPG*: октябрьская пара разделена по эпохам примерно на пять суток, две ноябрьские – менее чем на сутки. Техническая особенность серии *CPG* такова: 29 сентября работал лишь шестой модуль *eROSITA* (TM6), тогда как в трёх последующих сеансах были задействованы все семь камер (TM1–TM7).

Рассматриваемые сеансы *CPG* пришлись на этап Calibration and Performance Verification (Cal-PV), когда PG 1634+706 наблюдался при разных расстояниях от центра поля зрения (соосных) телескопов *eROSITA* и *ART-XC*. Конфигурация сеансов была следующей: в первом сеансе источник располагался почти на оси; во втором и третьем – со смещением порядка $2'-3'$; в заключительном – на расстоянии около $13'$ от центра. Из-за заметного падения эффективной площади *ART-XC* при больших смещениях данные позднего сеанса (26 ноября) *eROSITA* использовались лишь для анализа переменности потока; для спектрального моделирования они не применялись, как и соответствующие измерения *ART-XC* этого сеанса.

Осенние наблюдения PG 1634+706 на *XMM-Newton* выполнялись в режиме Small Window, при котором поле кадра составляет 258 на 258 угловых секунд для EPIC-PN, тогда как для EPIC-MOS – лишь 110 на 110 угловых секунд; из-за столь малого поля у MOS невозможно корректно задать фоновую область, необходимую для спектроскопического анализа, поэтому в дальнейший разбор

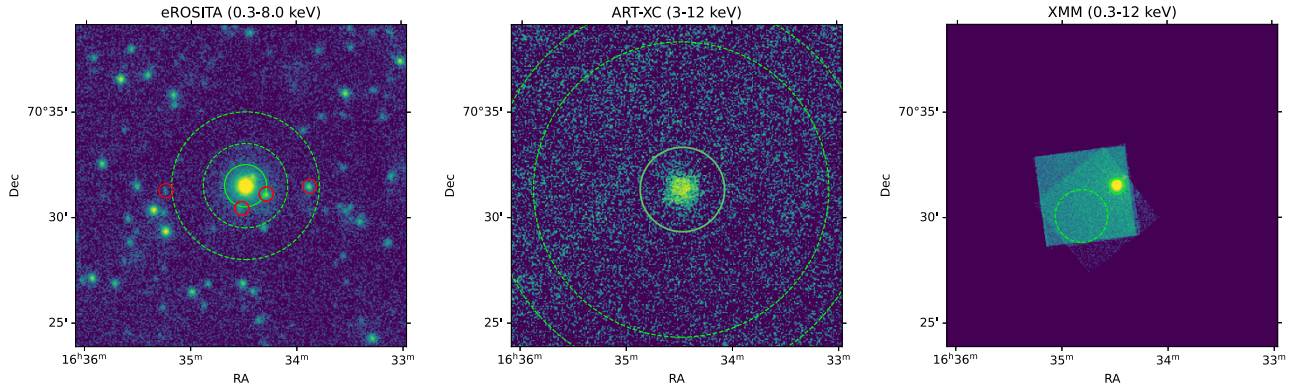


Рисунок 3.2 — Рентгеновские изображения квазара PG 1634+706, построенные по данным серий наблюдений (см. табл. 3.1) с помощью телескопов *eROSITA* и *ART-XC* обсерватории *CPT* а также камеры EPN обсерватории *XMM-Newton* (в энергетических диапазонах 0.3–8, 3–12 и 0.3–12 кэВ соответственно). На каждой панели зелёной сплошной окружностью показана область, из которой извлекался спектр источника, а пунктирные окружности обозначают области, использованные для определения фона (для *XMM-Newton* приведены области, соответствующие наблюдению от 25 октября 2019 года, OBSID=0852980501). Красные кружки на изображении *eROSITA* отмечают позиции других зарегистрированных источников, события из которых были исключены из дальнейшего спектрального и временного анализа.

включались только данные EPIC-PN (далее EPN), то есть измерения EPIC-MOS не использовались.

3.2.1 CPT/eROSITA

Наблюдения, проведенные телескопом *eROSITA*, обрабатывались с помощью набора программ eROSITA Science Analysis Software System (*eSASS*, релиз esass_211201) с использованием калибровочного набора caldb_211201 и вспомогательных утилит, разработанных в ИКИ РАН.

Рабочий набор событий формировался с применением *evtool* (v2.29.2/2.18)²: принимались только интервалы, удовлетворяющие маскам полезного времени QUALGTI, а промежутки переориентации аппарата *CPT* полностью исключались.

²erosita.mpe.mpg.de/edr/DataAnalysis/evtool_doc

лись. Эффективные экспозиции (с поправкой на виньетирование) по каждому сеансу приведены в табл. 3.1.

Спектры и кривые блеска извлекались с помощью программы *srctool*. Регион источника задавался кругом радиуса $1'$ (см. рис. 3.2); фон оценивался в кольце $2' - 3.5'$. Все события в пределах $20''$ от посторонних источников, зарегистрированных *eROSITA*, маскировались (см. рис. 3.2).

Для спектрального анализа каналы группировались до не менее чем 30 суммарных отсчётов на бин (аналогичный критерий применён и для данных *ART-XC*; см. ниже). Кривые блеска строились с шагом 1 кс; для сеанса 2019-09-29 использовалось разбиение 4 кс. При выбранной группировке в каждом временном окне оставалось не менее 15 суммарных отсчётов от источника и фона. На завершающем этапе из рассмотрения исключались интервалы, не попадающие в GTI. Оценки 68%-ных доверительных интервалов для темпа счёта получались методом Монте-Карло с пуассоновским разыгрыванием вкладов источника и фоновой компоненты.

3.2.2 CPG/ART-XC

Извлечение спектров выполнялось с использованием стандартного программного комплекса *ART-XC*, адаптированного для задач данного исследования и основанного на актуальной версии калибровок. В отдельных энергетических диапазонах были построены карты фотонов, экспозиций и виньетирования. Для учёта вклада фона частиц в измеренный спектр источника использовались модельные карты фонового излучения, сформированные по данным обзора всего неба в периоды, когда в поле зрения не было источников. Спектр квазара PG 1634+706 извлекался из области радиусом $2'$, тогда как фон оценивался в кольце с внутренним и внешним радиусами $7'$ и $9'$ соответственно (см. рис. 3.2). В кольцевой области модельная карта фоновых событий была нормирована на карту фона с учётом экспозиции, после чего скорректированная карта использовалась для вычитания подстилающего фона в области источника. Оставшиеся фотоны рассматривались как принадлежащие источнику и дополнительно корректировались на карту виньетирования для приведения к номинальной эффективной площади.

В пределах $2'$ от PG 1634+706 телескоп *eROSITA* регистрирует несколько слабых точечных источников (см. рис. 3.2). По оценкам *eROSITA*, их суммарный вклад в поток PG 1634+706 в диапазоне 0.3–8 кэВ не превосходит 5%. Поскольку пространственная разрешающая способность *ART-XC* не позволяет раздельно выделить эти компоненты, они попадают в апертуру вместе с квазаром; однако столь малая добавка не способна заметно исказить спектр, измеренный *ART-XC*.

В спектральном анализе использовались только каналы с $E > 5$ кэВ. Это связано с тем, что в области ~ 3 –4 кэВ, прилегающей к нижнему порогу чувствительности детекторов, отклик *ART-XC* калиброван с недостаточной точностью. Оставшиеся каналы группировались до не менее чем 30 суммарных отсчётов на бин, что обеспечивает корректное применение критерия χ^2 ; такая схема бинирования корректна для данных *ART-XC*, в которых фон уже вычтен.

3.2.3 XMM-Newton/EPN

Первичная обработка данных, полученных камерой EPN обсерватории *XMM-Newton*, выполнялась с помощью пакета Science Analysis System (SAS) версии v20.0. При этом применялись актуальные на момент выхода SAS v20.0 версии калибровочных файлов.

Полученный файл событий был отфильтрован: в анализе оставлялись только одиночные и двойные события ($PATTERN \leq 4$) в энергетическом диапазоне 0.3–12 кэВ. Из данных были исключены интервалы с повышенным уровнем фонового излучения³, а также события, приходящиеся на дефектные пиксели и их окрестности ($FLAG=0$).

Извлечение спектральных и временных данных выполнялось с использованием программы *xmmselect*. Области, соответствующие источнику и фону, подбирались таким образом, чтобы обеспечить максимальное отношение сигнала к шуму. На правой панели рис. 3.2 представлено суммарное изображение, построенное по результатам трёх наблюдений обсерватории *XMM-Newton*, проведённых в 2019 году.

³www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/sas-thread-epic-filterbackground

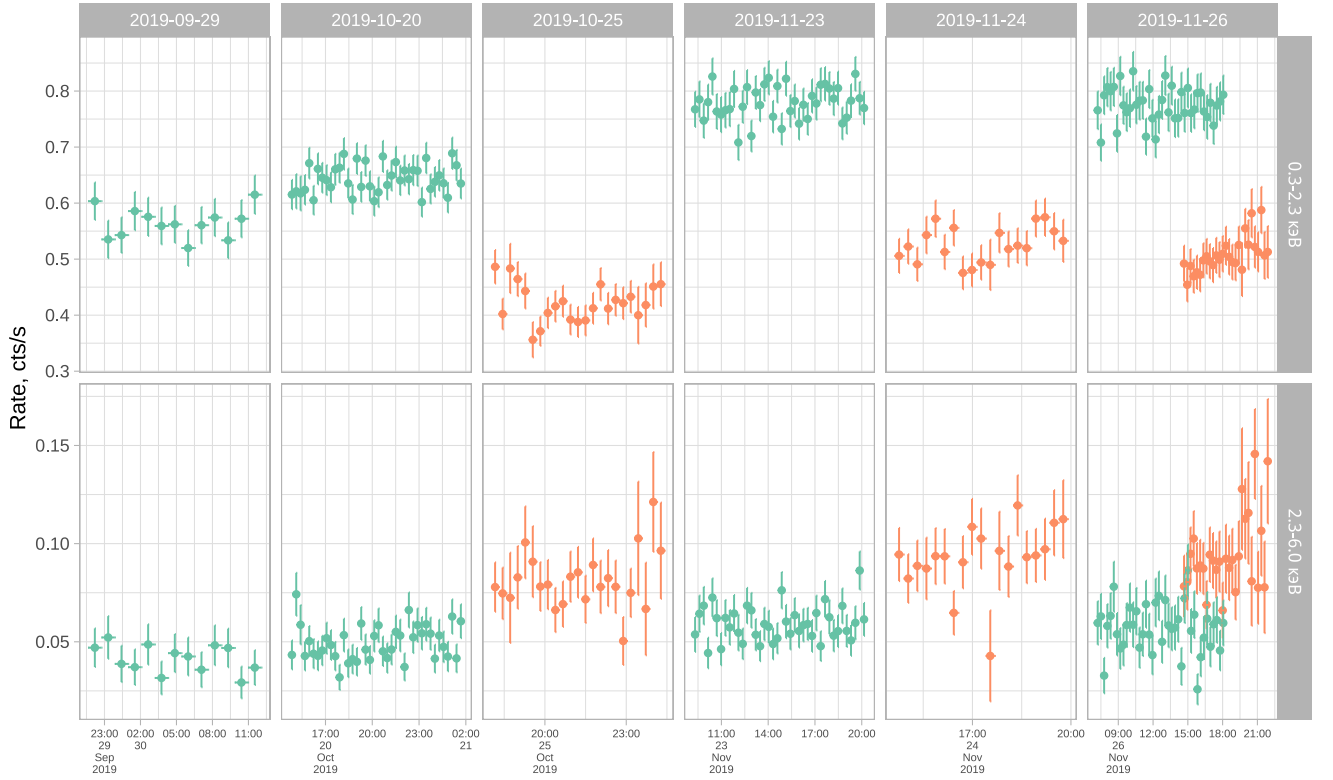


Рисунок 3.3 — Кривые блеска (в отсчётах в секунду), построенные по данным *CPG/eROSITA* (зелёный цвет) и *XMM-Newton/EPN* (оранжевый цвет) для отдельных наблюдений, в двух энергетических диапазонах: 0.3–2.3 кэВ (верхние панели) и 2.3–6.0 кэВ (нижние панели). Следует отметить, что абсолютные значения темпов счёта, полученные *eROSITA* и EPN, напрямую сопоставлять нельзя.

Для временного анализа кривые блеска формировались с шагом 1 кс. Интервалы с долей эффективного времени $\text{FRACEXP} < 0.1$ исключались. При такой дискретизации в каждом временном бине оставалось не менее 15 отсчётов от источника. Спектральные данные группировались до порога в пять отсчётов на энергетический канал. Это обеспечивает корректное применение W -статистики – модификации статистики Кэша для данных с фоном пуассоновской природы (далее – Cstat).

3.3 Быстрая переменность

Для оценки внутрисуточной рентгеновской переменности PG 1634+706 были построены временные ряды скорости счёта отдельно для каждого сеанса

Таблица 3.2 — Характеристики быстрой рентгеновской переменности.

Телескоп	Дата	χ^2 (dof)	$1 - p$	$\sigma_{\text{rms}}^2, 10^{-4}$
Диапазон энергий 0.3–2.3 кэВ				
<i>eROSITA</i>	2019-09-29	8.3(12)	0.759	-11 ± 7
	2019-10-20	33.9(39)	0.702	-2 ± 2
	2019-11-23	38.7(39)	0.482	-0.2 ± 3
	2019-11-26	31.9(39)	0.782	-4 ± 3
EPN	2019-10-25	25.1(22)	0.291	6 ± 16
	2019-11-24	17.4(18)	0.499	-3 ± 8
	2019-11-26	18.1(26)	0.872	-11 ± 12
Диапазон энергий 2.3–6.0 кэВ				
<i>eROSITA</i>	2019-09-29	7.1(12)	0.853	-222 ± 81
	2019-10-20	45.6(39)	0.217	63 ± 67
	2019-11-23	39(39)	0.468	11 ± 55
	2019-11-26	52.7(39)	0.070	60 ± 111
EPN	2019-10-25	15(22)	0.862	-108 ± 104
	2019-11-24	18.9(18)	0.399	60 ± 141
	2019-11-26	22.9(26)	0.637	56 ± 118

наблюдения *CPT/eROSITA* и *XMM-Newton/EPN*. На рис. 3.3 показана переменность по данным скорости счёта в двух энергетических поддиапазонах: 0.3–2.3 и 2.3–6.0 кэВ.

Анализ переменности выполнен по той же методике, что и в Главе 2. Статистическую значимость $1 - p$ переменности оценивали по критерию χ^2 (формула 2.4), амплитуду рентгеновской переменности – по определению σ_{rms}^2 (формула 2.5), а её ошибку – по формуле 2.8. Итоговые оценки статистик χ^2 (в скобках указано число степеней свободы), $1 - p$ и нормированной избыточной дисперсии σ_{rms}^2 приведены в табл. 3.2. Статистически значимой переменности (на уровне значимости больше 2σ) ни в одном из наблюдений *CPT/eROSITA* и *XMM-Newton* не обнаружено.

Проверялось наличие линейного тренда во временных рядах скорости счёта. Существенное улучшение по сравнению с моделью постоянного уровня получено лишь для наблюдения *XMM-Newton* 26 ноября 2019 г. в диапазоне 0.3–2.3 кэВ: добавление линейной модели заметно улучшает аппроксимацию ($p < 10^{-4}$), что соответствует плавному росту скорости счёта в ходе сеанса. В близком по времени сеансе *CPT/eROSITA*, начавшемся за несколько часов до *XMM-Newton* и частично с ним перекрывающемся, признаков аналогичного тренда не выявлено.

3.4 Рентгеновский спектр

Спектральное моделирование выполнялось в пакете *XSPEC* (v12.12.0⁴; [44]). Данные *eROSITA* и *ART-XC* рассматривались совместно, тогда как данные *XMM-Newton*/EPN анализировались отдельно. Для спектров *CPT* использовалась χ^2 -статистика на сгруппированных данных, а для *XMM-Newton*/EPN – W -статистика (модифицированная C -статистика).

В качестве начальной модели использовалась однокомпонентная модель степенного континуума с учётом поглощения в нашей Галактике. В обозначении *XSPEC* это:

$$TBabs \times zpowerlaw,$$

где $TBabs$ описывает поглощение в Галактике [52]. По аналогии с предыдущими работами по PG 1634+706 (см., напр., [158]) колонковую плотность водорода на луче зрения фиксировали на галактическом значении $N_H = 5.74 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ [159].

Качество аппроксимации выбранной эмпирической моделью показано на рис. 3.4 и 3.5. Для совместных данных *eROSITA*+*ART-XC* выполнялась подгонка при связанном фотонном индексе Γ , тогда как нормировка континуума допускалась различной от сеанса к сеансу (меняющийся поток). Чтобы учесть возможные межинструментальные расхождения и зависимость отклика от смещения относительно оптической оси, в модель был введён свободный кросс-калибровочный множитель между *eROSITA* и *ART-XC*. Аналогичный подход

⁴<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec>

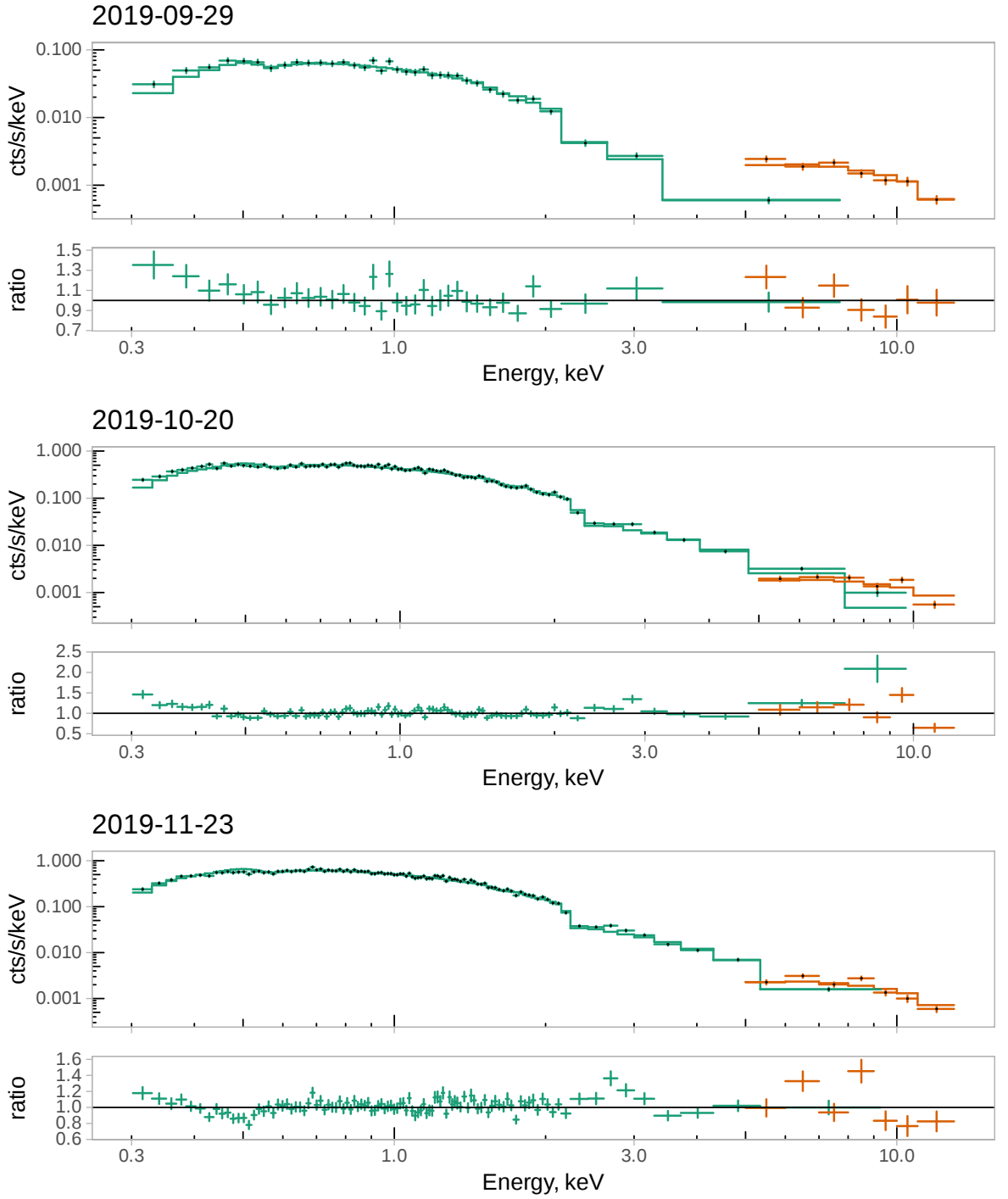


Рисунок 3.4 — Рентгеновский спектр квазара PG 1634+706, измеренный телескопами *eROSITA* (зеленый цвет) и *ART-XC* (оранжевый цвет) обсерватории *CPI* в разные даты. Все три спектра аппроксимировались совместно степенным законом с поглощением в Галактике, с единым наклоном, но разными нормировками (см. табл. 3.3). Для лучшей наглядности спектры на рисунке были перебинированы. Под каждым спектром показано отношение данных к модели.

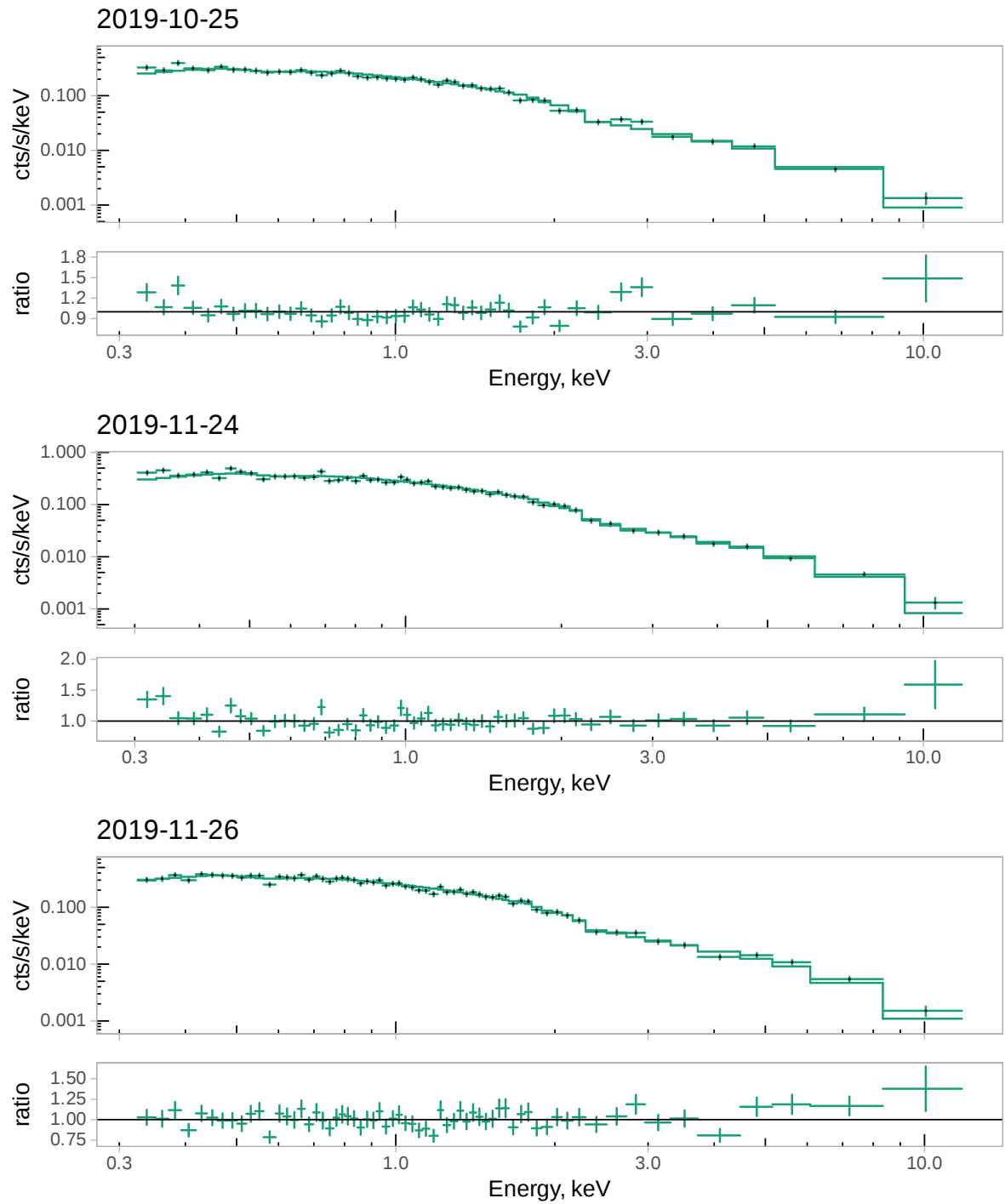


Рисунок 3.5 — Аналогично рис. 3.4, но для данных *XMM-Newton*.

Таблица 3.3 — Результаты аппроксимации спектров, измеренных обсерваториями *CPG* и *XMM-Newton*, степенным законом с поглощением.

CPG/ <i>eROSITA</i> , <i>ART-XC</i>			
Дата	2019-09-29	2019-10-20	2019-11-23
Диапазон энергий, кэВ	0.3–13	0.3–12	0.3–13
Counts	4409.0+556.0	25108.8+395.0	29712.6+507.0
Γ		1.843 ± 0.008	
F_X , 10^{-13} эрг/с/см ²	$5.17^{+0.11}_{-0.11}$	$5.92^{+0.09}_{-0.09}$	$7.03^{+0.11}_{-0.11}$
Constant	1.21 ± 0.06	0.96 ± 0.05	1.02 ± 0.05
χ^2 (dof)		1032 (790)	
XMM-Newton/EPN			
Дата	2019-10-25	2019-11-24	2019-11-26
Диапазон энергий, кэВ	0.3–11.8	0.3–11.8	0.3–11.8
Counts	5872.8	6602.6	8269.2
Γ		1.828 ± 0.011	
F (4–12 кэВ), 10^{-13} эрг/с/см ²	$6.42^{+0.16}_{-0.16}$	$8.01^{+0.20}_{-0.19}$	$7.72^{+0.19}_{-0.19}$
Cstat (dof)		2101 (2133)	

Counts – количество отсчетов от источника за вычетом фона (для наблюдений *CPG* приведены суммы отсчетов телескопов *eROSITA* и *ART-XC*), Γ – наклон спектра, F – поправленный за поглощение в Галактике поток в наблюдаемом диапазоне 4–12 кэВ, Constant – поправочный коэффициент для данных *ART-XC* относительно *eROSITA*, dof – количество степеней свободы.

применён к трём спектрам *XMM-Newton*: Γ считался общим для серии, а нормировки определялись независимо. Полученные параметры модели приведены в табл. 3.3. Если не указано иное, неопределённости соответствуют уровню доверия 68%, а верхние пределы приводятся на уровне 2σ .

Поглощённый степенной континуум в целом описывает наблюдаемые спектры, однако заметны отклонения данных от модели. Отмечаются три характерные особенности: 1) мягкий избыток при $E \sim 0.3\text{--}0.4$ кэВ; 2) локальное повышение темпа счета около $E \sim 2.7$ кэВ; 3) понижение темпа счета вблизи $E \sim 0.5$ кэВ. Первые две особенности присутствуют как в данных *CPG*, так и в *XMM-Newton* (в последнем случае выражены слабее), тогда как минимум около 0.5 кэВ отчётливо виден в спектре *CPG* от 23 ноября 2019 г. и с невысокой значимостью прослеживается в наблюдениях *CPG* от 20 октября 2019 г.

Мягкий избыток излучения при энергиях $E \lesssim 1$ кэВ (в системе отсчёта источника), обнаруженный у PG 1634+706, не является специфичным только для этого квазара. При достаточном качестве данных такая низкоэнергетическая добавка часто фиксируется в спектрах АЯГ 1-го типа, а её физическая природа остаётся предметом обсуждения (см., например, [46–48]). Один из рабочих сценариев связывает эту компоненту с комптонизацией ультрафиолетового излучения аккреционного диска в тёплой короне с температурой порядка нескольких миллионов К, тогда как основная степенная часть жёсткого рентгеновского спектра, как принято считать, формируется в горячей короне с $T \sim 10^9$ К.

Избыток потока на энергии около 2.7 кэВ в спектре PG 1634+706 численно совпадает с ожидаемым положением линии $K\alpha$ нейтрального или слабо ионизованного железа (6.4 кэВ), сдвинутой красным смещением источника: $6.4/(1+z) = 2.74$ кэВ. Это можно интерпретировать как проявление флуоресцентной линии железа либо неразрешенного по энергии комплекса таких линий. Что же касается понижения потока вблизи 0.5 кэВ, отмеченного в спектрах *eROSITA*, то вместе с мягким избытком на низких энергиях оно указывает на более сложную форму спектра, чем допускают использованные нами простые модели континуума.

Поскольку мягкая добавочная составляющая в спектре PG 1634+706 выявлена с недостаточной статистической достоверностью, проводить её детальное исследование нецелесообразно, и из дальнейшего анализа нижняя часть диапазона ($E < 0.7$ кэВ) была исключена. Мы ограничились энергиями 0.7–13 кэВ,

сосредоточив внимание на форме спектрального континуума и на локальной особенности в области линии Fe K α .

Дальнейший анализ выполнялся независимо для каждого из спектров *CPT* и *XMM-Newton*: допускались изменения как нормировки, так и формы континуума от сеанса к сеансу. Кросс-калибровочная константа для пары *eROSITA* и *ART-XC* на этом этапе не вводилась.

Рассматривались три модели описания рентгеновских спектров. Базовая – степенной континуум с учётом галактического поглощения (*TBabs* $\times$ *zpowerlaw* на языке *XSPEC*; далее обозначаем его как модель *PL*). Для учёта эмиссионной особенности в области 6.4 кэВ (в системе покоя квазара) к базовой модели добавлялась гауссова модель линии: *TBabs*(*zpowerlaw* + *zgauss*). Эту модель будем называть *PL+GAUSS*.

Если наблюдаемая эмиссионная линия железа связана с отражением жесткого рентгеновского излучения короны от аккреционного диска или газопылевого тора, то естественно ожидать также дополнительное излучение в спектральном континууме (на энергиях выше ~ 10 кэВ в системе покоя квазара). Поэтому мы рассмотрели еще одну модель, где к предыдущим двум компонентам была добавлена составляющая, связанная с отражением степенного континуума от холодного диска [55], т.е. использовалась модель *TBabs*(*zpowerlaw* + *zgauss* + *pexrav*), или *PL+GAUSS+PEXRAV*. Относительная нормировка отраженной компоненты *PEXRAV* по отношению к степенной компоненте *PL* описывалась параметром rel_{ref} , который для этой цели был задан отрицательным (см. описание *PEXRAV* в *XSPEC*); далее будем использовать обозначение $R_{\text{ref}} \equiv -rel_{\text{ref}}$. Спектральный наклон падающего излучения в компоненте *PEXRAV* был привязан к наклону компоненты *PL*. Обилие тяжелых элементов было зафиксировано на солнечном, согласно [160]. Косинус угла наклона был зафиксирован на значении 0.5. Завал на высоких энергиях (из-за эффекта отдачи) не рассматривался.

Из-за низкой значимости детектирования эмиссионной линии железа в спектрах *XMM-Newton*, при моделировании этих спектров моделями *PL+GAUSS* и *PL+GAUSS+PEXRAV* центральная энергия и ширина линии были зафиксированы на средневзвешенных значениях, полученных при аппроксимации спектров *CPT* моделью *PL+GAUSS+PEXRAV*.

На рис. 3.6 и рис. 3.7 показано, как спектры *CPT* и *XMM-Newton* аппроксимируются трехкомпонентной моделью *PL+GAUSS+PEXRAV*. В таблицах 3.4

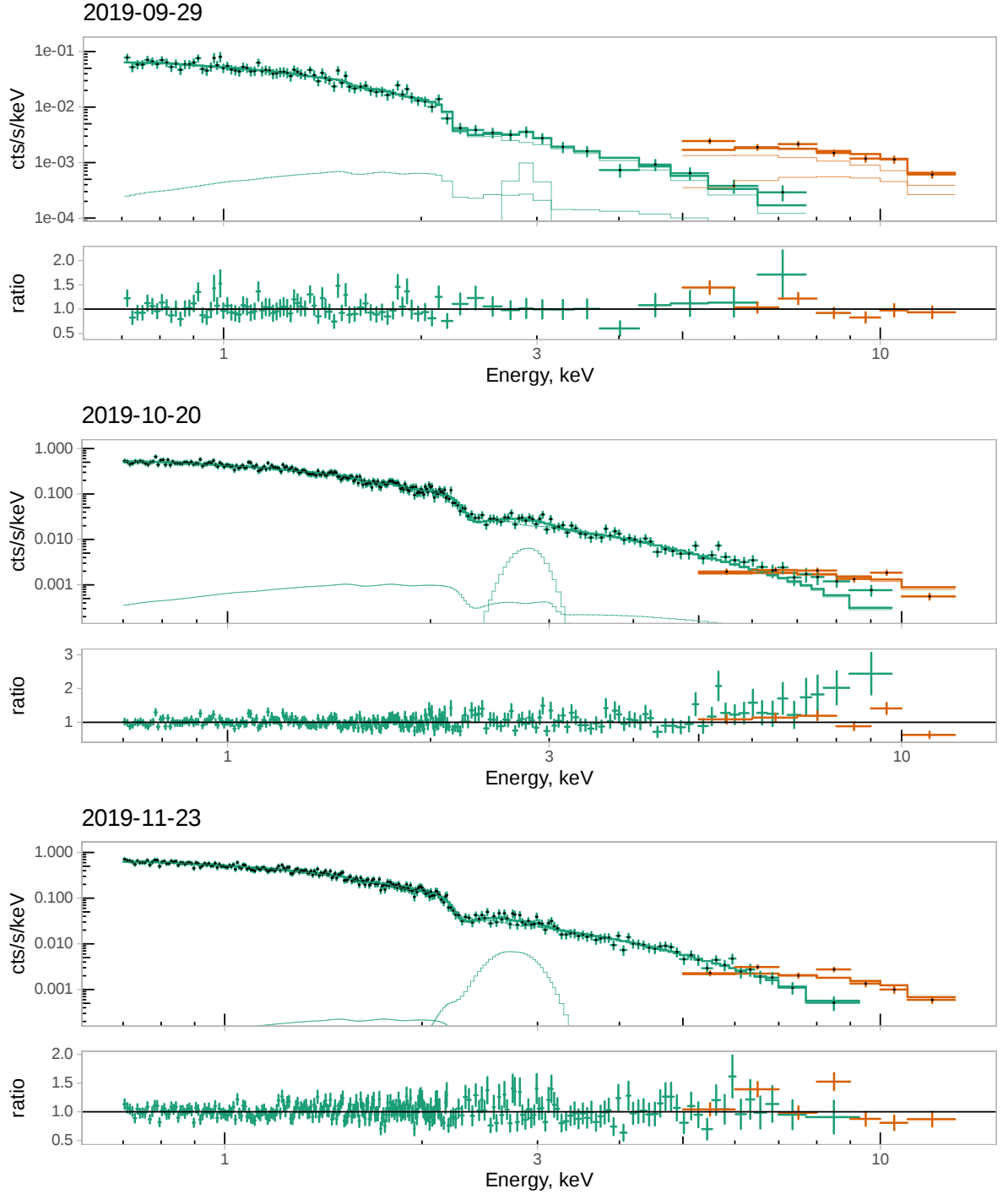


Рисунок 3.6 — Аппроксимация спектров квазара PG 1634+706, измеренных телескопами *eROSITA* (зеленый цвет) и *ART-XC* (оранжевый цвет) обсерватории *CPG* в разные даты, моделью $PL+GAUSS+PEXRAV$ с поглощением в Галактике (см. табл. 3.4). Сплошными линиями кроме совокупной модели показаны ее отдельные компоненты: степенной континуум PL , гауссова линия $GAUSS$ и отраженная компонента $PEXRAV$ (при наличии). Спектры перебинированы для наглядности. Под каждым спектром показано отношение данных к модели.

Таблица 3.4 — Результаты аппроксимации спектров, измеренных обсерваторией *CPI*, разными моделями.

Дата	2019-09-29	2019-10-20	2019-11-23
Диапазон энергий, кэВ	0.7–13 кэВ	0.7–12 кэВ	0.7–13 кэВ
Модель <i>PL</i>			
Γ	1.78 ± 0.02	1.864 ± 0.015	$1.850^{+0.014}_{-0.013}$
F_{PL} (4–12 кэВ), 10^{-13} эрг/с/см ²	5.7 ± 0.2	5.74 ± 0.15	7.05 ± 0.16
χ^2 (dof)	98.8 (91)	316.2 (263)	326 (272)
Модель <i>PL+GAUSS</i>			
Γ	1.78 ± 0.02	1.876 ± 0.016	1.866 ± 0.014
F_{PL} (4–12 кэВ), 10^{-13} эрг/с/см ²	5.7 ± 0.2	5.60 ± 0.16	6.82 ± 0.17
E_{line} , кэВ	$6.8^{+0.2}_{-0.4}$	$6.52^{+0.11}_{-0.13}$	6.44 ± 0.16
σ_{line} , кэВ	< 0.6 (68%)	$0.30^{+0.20}_{-0.12}$	$0.52^{+0.12}_{-0.13}$
EW , кэВ	0.08 ± 0.07	$0.11^{+0.03}_{-0.04}$	0.14 ± 0.04
χ^2 (dof)	97 (88)	302.1 (260)	306.7 (269)
Модель <i>PL+GAUSS+PEXRAV</i>			
Γ	$1.95^{+0.09}_{-0.08}$	1.90 ± 0.03	$1.870^{+0.025}_{-0.018}$
F_{PL} (4–12 кэВ), 10^{-13} эрг/с/см ²	$4.1^{+0.6}_{-0.7}$	5.4 ± 0.3	$6.8^{+0.2}_{-0.3}$
E_{line} , кэВ	6.8 ± 0.3	$6.51^{+0.12}_{-0.14}$	$6.44^{+0.15}_{-0.16}$
σ_{line} , кэВ	< 0.8 (68%)	$0.32^{+0.23}_{-0.13}$	$0.51^{+0.14}_{-0.11}$
EW , кэВ	0.12 ± 0.08	0.12 ± 0.04	$0.14^{+0.04}_{-0.06}$
R_{refl}	$0.19^{+0.08}_{-0.11}$	< 0.12	< 0.07
χ^2 (dof)	89.7 (87)	301.1 (259)	306.7 (268)

Γ , F_{PL} — наклон степенной компоненты и поправленный за поглощение в Галактике поток в наблюдаемом диапазоне 4–12 кэВ в этой компоненте; E_{line} , σ_{line} , EW — центральная энергия, ширина и эквивалентная ширина гауссовой линии; R_{refl} — коэффициент отражения; dof — количество степеней свободы.

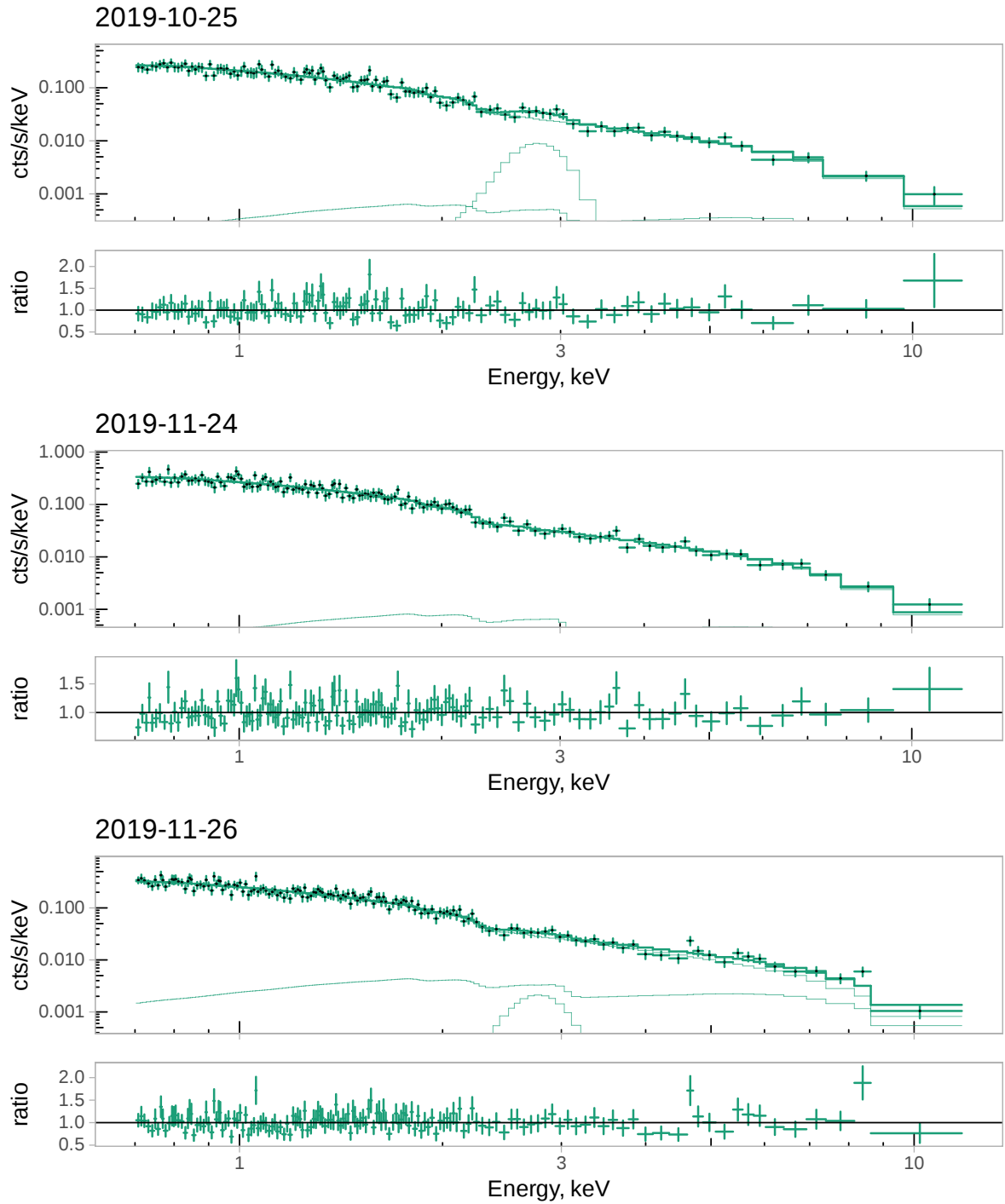


Рисунок 3.7 — Аналогично рис. 3.6, но для данных *XMM-Newton*.

Таблица 3.5 — Результаты аппроксимации спектров, измеренных обсерваторией *XMM-Newton*, разными моделями.

Дата	2019-10-25	2019-11-24	2019-11-26
Диапазон энергий, кэВ	0.7–11.8 кэВ	0.7–11.8 кэВ	0.7–11.8 кэВ
Модель <i>PL</i>			
Γ	1.78 ± 0.03	1.79 ± 0.03	1.78 ± 0.03
F_{PL} (4–12 кэВ), 10^{-13} эрг/с/см ²	6.8 ± 0.3	8.4 ± 0.4	$8.3^{+0.4}_{-0.3}$
Cstat (dof)	562.5 (584)	547.7 (574)	710.9 (747)
Модель <i>PL+GAUSS</i>			
Γ	1.81 ± 0.03	1.79 ± 0.03	1.79 ± 0.03
F_{PL} (4–12 кэВ), 10^{-13} эрг/с/см ²	$6.4^{+0.4}_{-0.3}$	8.4 ± 0.4	8.2 ± 0.4
E_{line} , кэВ	6.5 (фикс.)	6.5 (фикс.)	6.5 (фикс.)
σ_{line} , кэВ	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)
EW , кэВ	0.20 ± 0.06	< 0.11	< 0.13
Cstat (dof)	551.7 (583)	547.7 (573)	710.6 (746)
Модель <i>PL+GAUSS+PEXRAV</i>			
Γ	$1.83^{+0.06}_{-0.05}$	$1.81^{+0.05}_{-0.04}$	1.90 ± 0.06
F_{PL} (4–12 кэВ), 10^{-13} эрг/с/см ²	$6.1^{+0.6}_{-0.7}$	$8.0^{+0.7}_{-0.8}$	6.6 ± 0.7
E_{line} , кэВ	6.50 (фикс.)	6.50 (фикс.)	6.50 (фикс.)
σ_{line} , кэВ	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)
EW , кэВ	$0.20^{+0.05}_{-0.06}$	< 0.08	< 0.17
R_{refl}	< 0.3	< 0.2	$0.22^{+0.09}_{-0.11}$
Cstat (dof)	551.5 (582)	547.4 (572)	704.4 (745)

и 3.5 представлены параметры подгонки спектров моделями PL , $PL+GAUSS$ и $PL+GAUSS+PEXRAV$.

Добавление эмиссионной линии железа к степенной модели приводит к статистически значимому улучшению качества аппроксимации спектров CPT , полученных 20 октября и 23 ноября 2019 г. (напомним, что спектр, построенный по данным наблюдения 29 сентября, характеризуется значительно худшей статистикой из-за того, что в этом наблюдении работал только один из семи модулей телескопа *eROSITA*), а также спектра *XMM-Newton*, измеренного 25 октября 2019 г. При этом ширина линии по данным $CPT/eROSITA$ оказывается ненулевой, а положение центра линии ограничено в пределах от ~ 6.3 до ~ 6.6 кэВ для спектров, полученных 20 октября и 23 ноября 2019 г., т.е. совместимо с энергией 6.4 кэВ.

Отраженная непрерывная компонента ($PEXRAV$) не регистрируется статистически значимо ни в одном из полученных спектров, за исключением самого позднего наблюдения *XMM-Newton* (26 ноября 2019 г.), где есть слабое указание (на уровне ~ 2 стандартных отклонений) на ее присутствие.

На рис. 3.8 показано, как менялись параметры модели $PL+GAUSS+PEXRAV$ от наблюдения к наблюдению. Наклон спектра (степенной компоненты) и эквивалентная ширина линии железа не демонстрируют статистически значимой эволюции, оставаясь на значениях ~ 1.9 и ~ 120 эВ соответственно. При этом просматривается статистически значимый тренд увеличения потока в степенной спектральной компоненте.

3.5 Долговременная эволюция

Как уже отмечалось в разделе 3.1, квазар PG 1634+706 неоднократно наблюдался разными рентгеновскими обсерваториями начиная с 1981 года. Это позволяет проследить эволюцию его активности в рентгеновских лучах в течение примерно 17 лет в системе покоя источника. В таблице 3.6 собрана краткая информация о всех рентгеновских наблюдениях PG 1634+706, а именно наблюдениях обсерваториями Einstein, ROSAT, ASCA, Chandra, XMM-Newton, Swift и *CPT*.

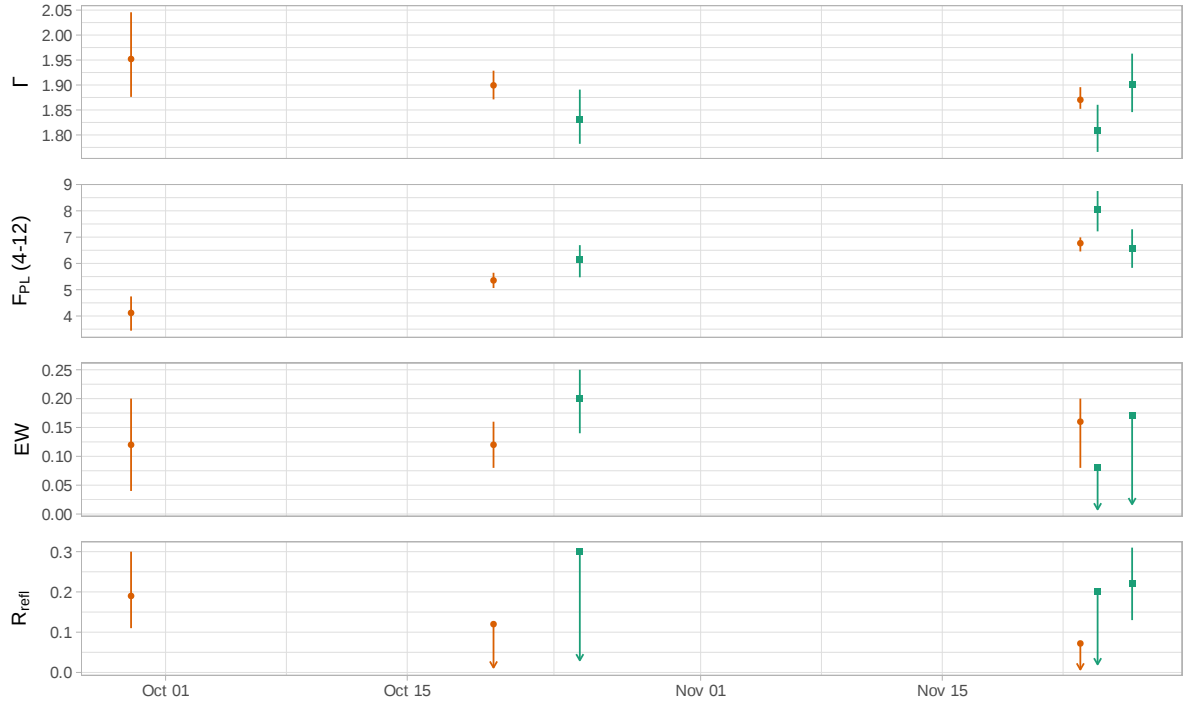


Рисунок 3.8 — Изменение параметров спектральной модели $PL+GAUSS+PEXRAV$ в ходе наблюдений обсерваторий *CPG* (рыжий цвет) и *XMM-Newton* (зеленый цвет) осенью 2019 года. Показаны (сверху вниз): наклон степенной компоненты, поток в степенной компоненте (в единицах 10^{-13} эрг/с/см²), эквивалентная ширина линии железа и относительная нормировка отраженной компоненты (см. табл. 3.4 и 3.5).

Таблица 3.6 — История рентгеновских наблюдений квазара PG 1634+706.

Дата	Обсерватория	OBSID	Экспозиция, кс	Ссылки	L_X , 10^{45} эрг/с
1981-02-06	Einstein	5351	1.83	1, 4, 9	$7.0^{+1.4}_{-1.4}$
1991-03-15	ROSAT	700246	9.01	9	$6.76^{+0.04}_{-0.04}$
1994-05-02	ASCA	71036000	47.7	2, 3, 9	$11.1^{+0.4}_{-0.4}$
1999-08-21	Chandra	1269	10.83	7, 8, 9	$6.8^{+0.2}_{-0.2}$
2000-03-23	Chandra	47	5.39	8, 9	$10.2^{+0.4}_{-0.4}$
2000-03-23	Chandra	62	4.85	8, 9	$10.3^{+0.4}_{-0.4}$
2000-03-24	Chandra	69	4.86	8, 9	$10.1^{+0.4}_{-0.4}$
2000-03-24	Chandra	70	4.86	8, 9	$9.7^{+0.4}_{-0.4}$
2000-03-24	Chandra	71	4.41	8, 9	$10.3^{+0.5}_{-0.5}$
2002-11-22	XMM-Newton	143150101	13.7	4, 6, 5, 9	$12.5^{+0.4}_{-0.4}$
2007-06-29	Swift	36672001	1.32	9	$4.9^{+1.0}_{-0.8}$
2007-06-29	Swift	36673001	1.48	9	$5.9^{+1.0}_{-0.9}$
2007-07-11	Swift	36672002	7.34	9	$5.2^{+0.4}_{-0.4}$
2008-04-22	Swift	36671002	2.09	9	$8.8^{+1.0}_{-0.9}$
2008-04-24	Swift	36673002	2.56	9	$7.3^{+0.8}_{-0.7}$

Продолжение таблицы 3.6

Дата	Обсерватория	OBSID	Экспозиция, кс	Ссылки	L_X , 10^{45} эрг/с
2008-04-26	Swift	36671003	3	9	$8.8^{+0.8}_{-0.7}$
2008-05-15	Swift	90030001	3.72	9	$8.4^{+0.7}_{-0.7}$
2008-06-12	Swift	90030002	3.25	9	$5.5^{+0.7}_{-0.6}$
2009-01-18	Swift	90030003	2.75	9	$5.0^{+0.7}_{-0.6}$
2012-06-11	Swift	91438001	1.26	9	$6.8^{+1.2}_{-1.0}$
2012-06-18	Swift	91438002	0.37	9	9^{+3}_{-2}
2012-06-22	Swift	91438004	0.42	9	$8.4^{+2.5}_{-1.9}$
2012-06-25	Swift	91438005	0.17	9	9^{+4}_{-3}
2012-06-26	Swift	91438006	0.36	9	10^{+3}_{-2}
2012-06-28	Swift	91438007	0.5	9	$7.8^{+2.2}_{-1.7}$
2012-07-01	Swift	91438008	5.88	9	$11.5^{+0.7}_{-0.6}$
2019-09-29	<i>CPI</i>		48.3, 55.0	10	$6.31^{+0.11}_{-0.11}$
2019-10-20	<i>CPI</i>		37.7, 39.0	10	$7.13^{+0.05}_{-0.05}$
2019-10-25	XMM-Newton	852980501	14.4	10	$7.51^{+0.13}_{-0.13}$
2019-11-23	<i>CPI</i>		37.0, 38.3	10	$8.55^{+0.06}_{-0.06}$
2019-11-24	XMM-Newton	852980301	12.7	10	$9.43^{+0.15}_{-0.15}$
2019-11-26	XMM-Newton	852980401	17.3	10	$9.16^{+0.13}_{-0.13}$
2019-11-26	<i>CPI</i>		39.8	10	$8.40^{+0.07}_{-0.07}$

Ссылки: (1) [154], (2) [161], (3) [162], (4) [163], (5) [164], (6) [158], (7) [165], (8) [166], (9) [151], (10) эта работа. Обозначение L_X соответствует рентгеновской светимости в диапазоне 2–10 кэВ, пересчитанной в систему отсчёта квазара и скорректированной на межзвёздное поглощение в нашей Галактике.

Для сопоставления с ранними результатами использовались оценки, опубликованные в [151]: там для всех наблюдений, выполненных до конца 2012 года, приведены потоки в наблюдаемом диапазоне 0.2–10 кэВ с учётом поглощения межзвёздным веществом нашей Галактики. При вычислении этих величин спектр источника задавался степенным континуумом с фиксированным наклоном $\Gamma = 2$. В дополнение к [151] учтены новые данные *CPI* и *XMM-Newton* (это наиболее поздние по времени наблюдения, включённые в анализ). Полученные значения рентгеновской светимости и их доверительные интервалы приведены в табл. 3.6. В данном случае формальные неопределённости невелики (как правило, $\lesssim 2\%$). Для сопоставления: при совместной подгонке спектров *CPI* и

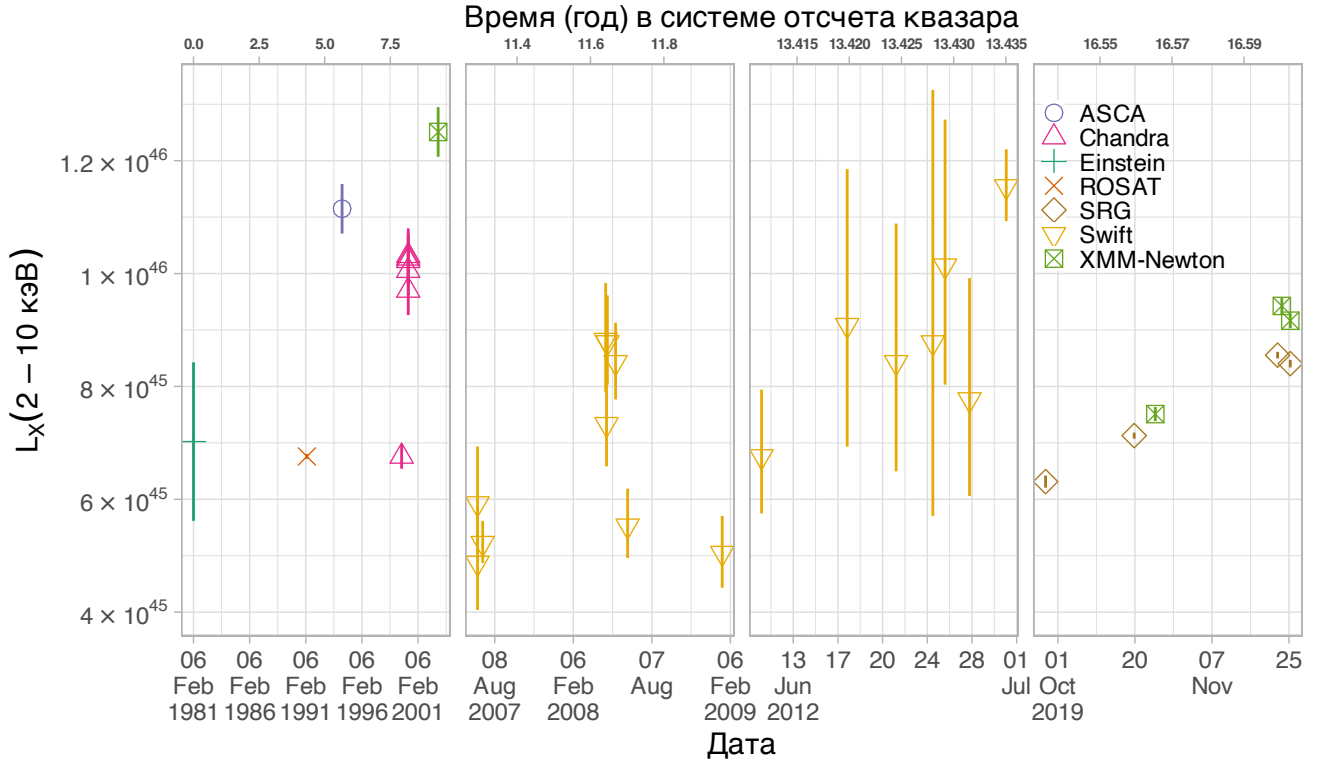


Рисунок 3.9 — Долговременная эволюция рентгеновской светимости квазара PG 1634+706. Светимость приведена в диапазоне энергий 2–10 кэВ в системе отсчета источника. Показаны 1σ -статистические погрешности измерений. На нижней оси отложены даты наблюдений, на верхней — время, прошедшее с момента первого наблюдения в системе покоя источника.

XMM-Newton (см. табл. 3.4 и 3.5) ошибки на поток степенного континуума получались существенно больше, поскольку там варьировался наклон Γ вместе с рядом других параметров модели, и возникающие между ними вырождения увеличивали статистическую погрешность.

Поскольку набор использованных измерений получен разными инструментами и не в полностью совпадающих энергетических полосах, в оценки светимости неизбежно вносится межинструментальная систематика. Для наблюдений после 2000 г., когда выполнена тщательная кросс-калибровка современных рентгеновских обсерваторий и рабочие диапазоны близки, масштаб такой систематики, по имеющимся оценкам, обычно не превышает 10–20% [151]. Иная ситуация с более ранними данными: для миссий *Einstein* и *ROSAT* вклад систематики может быть существенно выше, поскольку светимости оценивались по мягким полосам 0.3–3.3 и 0.5–2.0 кэВ соответственно.

Долговременные изменения рентгеновской светимости PG 1634+706 за 1981–2019 гг. представлены на рис. 3.9. Несмотря на большие временные раз-

рывы, из кривой блеска следует, что источник меняется на масштабах от нескольких суток до нескольких лет (в системе покоя). Наибольшее значение светимости – $\sim 1.25 \times 10^{46}$ эрг с^{-1} (ноябрь 2002 г.), наименьшее – $\sim 5 \times 10^{45}$ эрг с^{-1} (январь 2009 г.), что означает изменение уровня светимости примерно в 2.5 раза. Получено $\sigma_{\text{rms}}^2 = 0.030 \pm 0.016$ (см. формулу 2.5), что соответствует типичной относительной амплитуде вариаций порядка 16%. Во время серии наблюдений *CPI* и *XMM-Newton* в 2019 г. объект находился на промежуточном уровне: светимость лежала в пределах $(6\text{--}9) \times 10^{45}$ эрг с^{-1} и плавно возрастала.

Сопоставим наши результаты с общей картиной рентгеновской переменности АЯГ. По данным [167], полученным на репрезентативной выборке ярких в рентгеновском энергетическом диапазоне квазаров из спектроскопического обзора SDSS с использованием обзора всего неба *CPI/eROSITA* и архива *XMM-Newton*, типичная величина изменений со временем растёт, тогда как при увеличении светимости амплитуда переменности снижается. Для источников с $L_X \sim 10^{46}$ эрг с^{-1} на интервалах 10–20 лет характерный масштаб колебаний соответствует коэффициенту ~ 1.4 между двумя случайно выбранными измерениями потока, при этом наблюдается существенный разброс между объектами. На этом фоне поведение PG 1634+706 соответствует типичной картине для квазаров сопоставимой светимости.

3.6 Заключение

Хотя квазар PG 1634+706 уже неоднократно исследовался в рентгене ранее, новые наблюдения с помощью обсерваторий *CPI* и *XMM-Newton* позволили нам более точно измерить его энергетический спектр в широком диапазоне $\sim 1\text{--}30$ кэВ (в системе покоя квазара). Одним из наиболее интересных результатов стало обнаружение широкой (~ 1 кэВ на половине высоты) эмиссионной линии железа в спектре, с эквивалентной шириной ~ 120 эВ. Средневзвешенное по разным наблюдениям положение центроида линии согласуется с энергией 6.4 кэВ, соответствующей переходу K_α в нейтральном атоме железа (и не согласуется с энергией 6.7 кэВ триплета гелиеподобного железа в случае излучения

горячей разреженной плазмы). При этом уширение линии является статистически значимым.

Естественно предположить, что эта эмиссионная особенность связана с отражением жесткого рентгеновского излучения горячей короны от аккреционного диска и, возможно, газопылевого тора. При этом должна возникать также отраженная компонента в спектральном континууме. Поиск такой компоненты по данным *СРГ* и *ХММ-Newton* не привел к значимому детектированию. Коэффициент отражения в модели *PEXRAV* составляет $R_{\text{refl}} \lesssim 0.3$. Этот предел и измеренная эквивалентная ширина эмиссионной линии железа согласуются со сценарием отражения коронального излучения от оптически толстого, холодного диска (например, [168]). При этом значительное уширение линии может быть связано с доплеровским уширением в аккреционном диске (для этого требуются лучевые скорости $v_r/c \sim 0.06$), как это часто обсуждалось в контексте рентгеновских двойных систем и АЯГ (см., например, обзор [169]), а также с отражением от сильно ионизованного газа во внутренней области диска (в этом случае возникает комплекс $K\alpha$ линий разных ионов железа; см., например, [170; 171]).

Что касается основной (степенной) компоненты спектра, то измеренные в разных наблюдениях *СРГ* и *ХММ-Newton* значения ее наклона согласуются друг с другом в пределах погрешностей и находятся в диапазоне от 1.8 до 2.0. Такие значения являются обычными для сейфертовских галактик и квазаров умеренной светимости. Таким образом, в случае квазара PG 1634+706 мы не видим подтверждения тенденции значительного укручения рентгеновского континуума с увеличением светимости и/или эддингтоновского отношения, которая отмечалась для АЯГ рядом авторов [172; 173], но ставилась под сомнение в других работах (например, [174]).

Помимо спектральных свойств мы исследовали переменность рентгеновского излучения квазара PG 1634+706. На временах порядка нескольких часов (здесь и далее все временные интервалы приводятся в системе покоя квазара) его рентгеновская светимость не демонстрирует статистически значимой переменности. Однако светимость заметно менялась от наблюдения к наблюдению осенью 2019 года, увеличившись примерно на 50% за ~ 25 дней. Сравнение этих новых измерений обсерваторий *СРГ* и *ХММ-Newton* с предыдущими измерениями других рентгеновских обсерваторий показало, что за всю 17-летнюю историю наблюдений квазара PG 1634+706 его рентгеновская светимость варьи-

ровалась не более чем в 2.5 раза, а вариации на масштабах времени нескольких недель и нескольких лет сравнимы по амплитуде.

Заключение

Полученные в диссертации результаты вносят значимый вклад в развитие исследований рентгеновских источников, обнаруженных в диапазоне энергий 4–12 кэВ в ходе обзора всего неба телескопа *ART-XC* им. М.Н. Павлинского обсерватории *СРГ*, а также физических и популяционных свойств активных ядер галактик. Проведено комплексное оптическое отождествление кандидатов в АЯГ, что позволило существенно увеличить полноту каталога ARTSS1-5 и установить природу 48 объектов, в том числе 15 ранее неизвестных рентгеновских источников. Установлено, что все они являются сейфертовскими галактиками разных типов, охватывающими широкий диапазон светимостей, на красных смещениях $z = 0.014\text{--}0.283$, включая один радиогромкий объект. Анализ рентгеновских данных телескопов *eROSITA* и *ART-XC* показал, что в ряде объектов присутствует значительное внутреннее поглощение, в том числе выявлены кандидаты в комптоновски-толстые АЯГ. Полученные оценки масс чёрных дыр и эддингтоновских отношений подтверждают, что темпы аккреции на сверхмассивные черные дыры в АЯГ варьируются в широких пределах. Помимо результатов, полученных по основной выборке АЯГ, важное значение имеют и результаты отдельного, более детального исследования двух квазаров высокой светимости: радиогромкого, сильно поглощённого SRGA J2306+1556 на $z = 0.44$ и PG 1634+706 на $z = 1.34$. Их наблюдательные характеристики расширяют представления о физических свойствах и статистике наиболее энергичных АЯГ. Полученные результаты дополняют современную картину роста СМЧД во Вселенной и уточняют соотношение между поглощёнными и непоглощёнными АЯГ в локальной Вселенной. Они могут быть использованы при построении физических моделей активных ядер галактик, а также для планирования последующих наблюдений с использованием действующих и перспективных рентгеновских обсерваторий.

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. — октябрь. — 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. — октября. — Vol. 380. — P. L51.
15. The ROSAT all-sky survey bright source catalogue / W. Voges, B. Aschenbach, Th. Boller et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1999. — сентября. — 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. — апреля. — 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. — августа. — 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. — марта. — 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>.
23. SRG X-ray orbital observatory / R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — 12. — Vol. 656. — P. A132. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202141179>.
24. SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first year / M. Pavlinsky, S. Sazonov, R. Burenin et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — 05. — Vol. 661. — P. A38. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202141770>.
25. Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора всего неба / И. А. Зазнобин, Г. С. Усков, С. Ю. Сазонов и др. // *Письма в Астрономический журнал*. — 2021. — feb. — Т. 47, № 2. — С. 89–106.
26. SRG/ART-XC discovery of SRGA J204318.2+443815: Towards the complete population of faint X-ray pulsars / A. A. Lutovinov, S. S. Tsygankov, I. A. Mereminskiy et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — may. — Vol. 661. — P. A28.
27. Peculiar X-ray transient SRGA J043520.9+552226/AT2019wey discovered with SRG/ART-XC / I. A. Mereminskiy, A. V. Dodin, A. A. Lutovinov et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — may. — Vol. 661. — P. A32.
28. Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и ePOZITA обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора всего неба /

- Г. С. Усков, И. А. Зазнобин, С. Ю. Сазонов и др. // *Письма в Астрономический журнал*. — 2022. — feb. — Т. 48, № 2. — С. 95–118.
29. Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и ePOZITA в ходе первых пяти рентгеновских обзоров всего неба обсерватории СРГ / Г. С. Усков, С. Ю. Сазонов, И. А. Зазнобин и др. // *Письма в Астрономический журнал*. — 2023. — feb. — Т. 49, № 2. — С. 97–121.
 30. Новые активные ядра галактик, обнаруженные телескопами ART-XC и ePOZITA в ходе первых пяти рентгеновских обзоров всего неба обсерватории СРГ. Часть 2 / Г. С. Усков, С. Ю. Сазонов, И. А. Зазнобин и др. // *Письма в Астрономический журнал*. — 2024. — may. — Т. 50, № 5. — С. 339–360.
 31. The Pan-STARRS1 Surveys / K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe et al. // *arXiv e-prints*. — 2016. — dec. — P. arXiv:1612.05560.
 32. The SkyMapper Telescope and The Southern Sky Survey / S. C. Keller, B. P. Schmidt, M. S. Bessell et al. // *Publ. Astron. Soc. Australia*. — 2007. — may. — Vol. 24, no. 1. — Pp. 1–12.
 33. The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra / Romina Ahumada, Carlos Allende Prieto, Andrés Almeida et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2020. — jul. — Vol. 249, no. 1. — P. 3.
 34. The 6dF Galaxy Survey: final redshift release (DR3) and southern large-scale structures / D. Heath Jones, Mike A. Read, Will Saunders et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — 10. — Vol. 399, no. 2. — Pp. 683–698. — URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15338.x>.
 35. Wide-range astronomical telescope / S. F. Kamus, S. A. Denisenko, N. A. Lipin et al. // *J. Opt. Technol.* — 2002. — Sep. — Vol. 69, no. 9. — P. 674. — URL: <https://opg.optica.org/jot/abstract.cfm?URI=jot-69-9-674>.
 36. ADAM low- and medium-resolution spectrograph for 1.6-m AZT-33IK telescope / V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, V. R. Amirkhanyan, A. V. Moiseev //

- Astrophysical Bulletin*. — 2016. — 10. — Vol. 71, no. 4. — Pp. 479–488. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1990341316040118>.
37. Observational capabilities of the new medium- and low-resolution spectrograph at the 1.6-m telescope of the Sayan Observatory / R. A. Burenin, A. L. Amvrosov, M. V. Eselevich et al. // *Astronomy Letters*. — 2016. — 05. — Vol. 42, no. 5. — Pp. 295–306. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063773716050017>.
 38. *Cardelli Jason A., Clayton Geoffrey C., Mathis John S.* The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction // *The Astrophysical Journal*. — 1989. — oct. — Vol. 345. — P. 245.
 39. A Map of Dust Reddening to 4.5 kpc from Pan-STARRS1 / E. F. Schlafly, G. Green, D. P. Finkbeiner et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — jul. — Vol. 789, no. 1. — P. 15.
 40. *Schlafly Edward F., Finkbeiner Douglas P.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — aug. — Vol. 737, no. 2. — P. 103.
 41. The Baryon Oscillation Spectroscopic Survey of SDSS-III / Kyle S. Dawson, David J. Schlegel, Christopher P. Ahn et al. // *AJ*. — 2013. — jan. — Vol. 145, no. 1. — P. 10.
 42. The Multi-object, Fiber-fed Spectrographs for the Sloan Digital Sky Survey and the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey / Stephen A. Smee, James E. Gunn, Alan Uomoto et al. // *AJ*. — 2013. — aug. — Vol. 146, no. 2. — P. 32.
 43. SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first year / M. Pavlinsky, S. Sazonov, R. Burenin et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — may. — Vol. 661. — P. A38.
 44. *Arnaud K. A.* XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / Ed. by George H. Jacoby, Jeannette Barnes. — Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1996. — jan. — P. 17.

45. *Cash W.* Parameter estimation in astronomy through application of the likelihood ratio. // *The Astrophysical Journal*. — 1979. — mar. — Vol. 228. — Pp. 939–947.
46. *Turner T. J., Pounds K. A.* The EXOSAT spectral survey of AGN. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1989. — oct. — Vol. 240. — Pp. 833–880.
47. *Guainazzi Matteo, Bianchi Stefano.* On the origin of soft X-rays in obscured AGN: answers from high-resolution spectroscopy with XMM-Newton // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2007. — feb. — Vol. 374, no. 4. — Pp. 1290–1302.
48. *Boissay Rozenn, Ricci Claudio, Paltani Stéphane.* A hard X-ray view of the soft excess in AGN // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — apr. — Vol. 588. — P. A70.
49. *Guainazzi M., Matt G., Perola G. C.* X-ray obscuration and obscured AGN in the local universe // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — dec. — Vol. 444, no. 1. — Pp. 119–132.
50. *Guainazzi Matteo, Bianchi Stefano.* On the origin of soft X-rays in obscured AGN: answers from high-resolution spectroscopy with XMM-Newton // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2007. — feb. — Vol. 374, no. 4. — Pp. 1290–1302.
51. Collisional Plasma Models with APEC/APED: Emission-Line Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions / Randall K. Smith, Nancy S. Brickhouse, Duane A. Liedahl, John C. Raymond // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2001. — aug. — Vol. 556, no. 2. — Pp. L91–L95.
52. *Wilms J., Allen A., McCray R.* On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — oct. — Vol. 542, no. 2. — Pp. 914–924.
53. HI4PI: A full-sky H I survey based on EBHIS and GASS / HI4PI Collaboration, N. Ben Bekhti, L. Flöer et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — oct. — Vol. 594. — P. A116.

54. *Pozdnyakov L. A., Sobol I. M., Syunyaev R. A.* Comptonization and the shaping of X-ray source spectra - Monte Carlo calculations // *Astrophys. Space Phys. Res.* — 1983. — jan. — Vol. 2. — Pp. 189–331.
55. *Magdziarz Pawel, Zdziarski Andrzej A.* Angle-dependent Compton reflection of X-rays and gamma-rays // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 1995. — apr. — Vol. 273, no. 3. — Pp. 837–848.
56. *Melazzini F., Sazonov S.* What Can We Learn about Compton-Thin AGN Tori from Their X-ray Spectra? * // *Astronomy Letters.* — 2023. — jun. — Vol. 49, no. 6. — Pp. 301–319.
57. *Osterbrock D. E.* Seyfert galaxies with weak broad H alpha emission lines // *The Astrophysical Journal.* — 1981. — 10. — Vol. 249. — P. 462. — URL: <http://dx.doi.org/10.1086/159306>.
58. *Véron-Cetty M.-P., Véron P., Gonçalves A. C.* A spectrophotometric atlas of Narrow-Line Seyfert 1 galaxies // *Astronomy & Astrophysics.* — 2001. — 06. — Vol. 372, no. 3. — Pp. 730–754. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010489>.
59. *Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R.* Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* — 1981. — 02. — Vol. 93. — P. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1086/130766>.
60. The host galaxies of active galactic nuclei / Guinevere Kauffmann, Timothy M. Heckman, Christy Tremonti et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2003. — 12. — Vol. 346, no. 4. — Pp. 1055–1077. — URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x>.
61. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies / L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland et al. // *The Astrophysical Journal.* — 2001. — 07. — Vol. 556, no. 1. — Pp. 121–140. — URL: <http://dx.doi.org/10.1086/321545>.
62. Observational evidence for AGN feedback in early-type galaxies / K. Schawinski, D. Thomas, M. Sarzi et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2007. — 12. — Vol. 382, no. 4. — Pp. 1415–1431. — URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12487.x>.

63. *Cardelli Jason A., Clayton Geoffrey C., Mathis John S.* The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction // *The Astrophysical Journal*. — 1989. — oct. — Vol. 345. — P. 245.
64. Broad-line Balmer decrements in blue active galactic nuclei / Xiaobo Dong, Tinggui Wang, Jianguo Wang et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2008. — января. — Vol. 383, no. 2. — Pp. 581–592.
65. *Greene Jenny E., Ho Luis C.* Estimating Black Hole Masses in Active Galaxies Using the H α Emission Line // *The Astrophysical Journal*. — 2005. — сентября. — Vol. 630, no. 1. — Pp. 122–129.
66. Contribution of the Accretion Disk, Hot Corona, and Obscuring Torus to the Luminosity of Seyfert Galaxies: INTEGRAL and Spitzer Observations / S. Sazonov, S. P. Willner, A. D. Goulding et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — oct. — Vol. 757, no. 2. — P. 181.
67. *Prokhorenko S. A., Sazonov S. Yu.* The Growth Rate of Supermassive Black Holes and Its Dependence on the Stellar Mass of Galaxies at the Present Epoch // *Astronomy Letters*. — 2021. — августа. — Vol. 47, no. 8. — Pp. 515–533.
68. BASS. XXX. Distribution Functions of DR2 Eddington Ratios, Black Hole Masses, and X-Ray Luminosities / Tonima Tasnim Ananna, Anna K. Weigel, Benny Trakhtenbrot et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2022. — jul. — Vol. 261, no. 1. — P. 9.
69. *Mathur Smita.* Narrow-line Seyfert 1 galaxies and the evolution of galaxies and active galaxies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2000. — июня. — Vol. 314, no. 4. — Pp. L17–L20.
70. BAT AGN Spectroscopic Survey (BASS) - VI. The Γ_X -L/L_{Edd} relation / Benny Trakhtenbrot, Claudio Ricci, Michael J. Koss et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — сентября. — Vol. 470, no. 1. — Pp. 800–814.
71. *Brandt W. N., Mathur S., Elvis M.* A comparison of the hard ASCA spectral slopes of broad- and narrow-line Seyfert 1 galaxies // *Monthly Notices*

- of the Royal Astronomical Society*. — 1997. — марта. — Vol. 285, no. 3. — Pp. L25–L30.
72. *Leighly Karen M.* A Comprehensive Spectral and Variability Study of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies Observed by ASCA. II. Spectral Analysis and Correlations // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1999. — декабря. — Vol. 125, no. 2. — Pp. 317–348.
 73. *Cutri R. M., Wright E. L., Conrow T. et al.* VizieR Online Data Catalog: AllWISE Data Release (Cutri+ 2013). — VizieR On-line Data Catalog: II/328. Originally published in: IPAC/Caltech (2013). — 2021. — feb.
 74. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance / Edward L. Wright, Peter R. M. Eisenhardt, Amy K. Mainzer et al. // *AJ*. — 2010. — декабря. — Vol. 140, no. 6. — Pp. 1868–1881.
 75. The Karl G. Jansky Very Large Array Sky Survey (VLASS). Science Case and Survey Design / M. Lacy, S. A. Baum, C. J. Chandler et al. // *PASP*. — 2020. — mar. — Vol. 132, no. 1009. — P. 035001.
 76. The NRAO VLA Sky Survey / J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al. // *AJ*. — 1998. — may. — Vol. 115, no. 5. — Pp. 1693–1716.
 77. The Rapid ASKAP Continuum Survey Paper II: First Stokes I Source Catalogue Data Release / Catherine L. Hale, D. McConnell, A. J. M. Thomson et al. // *Publ. Astron. Soc. Australia*. — 2021. — nov. — Vol. 38. — P. e058.
 78. Mid-infrared Selection of Active Galactic Nuclei with the Wide-Field Infrared Survey Explorer. I. Characterizing WISE-selected Active Galactic Nuclei in COSMOS / Daniel Stern, Roberto J. Assef, Dominic J. Benford et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — jul. — Vol. 753, no. 1. — P. 30.
 79. The LOFAR window on star-forming galaxies and AGNs - curved radio SEDs and IR-radio correlation at $0 < z < 2.5$ / G. Calistro Rivera, W. L. Williams, M. J. Hardcastle et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — августа. — Vol. 469, no. 3. — Pp. 3468–3488.

80. 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. — мая. — Vol. 786, no. 2. — P. 104.
81. *Sazonov S., Churazov E., Krivonos R.* Does the obscured AGN fraction really depend on luminosity? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — декабрь. — Vol. 454, no. 2. — Pp. 1202–1220.
82. BAT AGN Spectroscopic Survey. V. X-Ray Properties of the Swift/BAT 70-month AGN Catalog / C. Ricci, B. Trakhtenbrot, M. J. Koss et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2017. — dec. — Vol. 233, no. 2. — P. 17.
83. The SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: The Quasar Luminosity Function from Data Release Nine / Nicholas P. Ross, Ian D. McGreer, Martin White et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — aug. — Vol. 773, no. 1. — P. 14.
84. The evolution of the X-ray luminosity functions of unabsorbed and absorbed AGNs out to $z \sim 5$ / J. Aird, A. L. Coil, A. Georgakakis et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — aug. — Vol. 451, no. 2. — Pp. 1892–1927.
85. The bolometric quasar luminosity function at $z = 0-7$ / Xuejian Shen, Philip F. Hopkins, Claude-André Faucher-Giguère et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — jan. — Vol. 495, no. 3. — Pp. 3252–3275.
86. *Shankar Francesco, Weinberg David H., Miralda-Escudé Jordi.* Self-Consistent Models of the AGN and Black Hole Populations: Duty Cycles, Accretion Rates, and the Mean Radiative Efficiency // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — jan. — Vol. 690, no. 1. — Pp. 20–41.
87. Cosmological simulations of black hole growth: AGN luminosities and down-sizing / Michaela Hirschmann, Klaus Dolag, Alexandro Saro et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — aug. — Vol. 442, no. 3. — Pp. 2304–2324.

88. Supermassive black holes and their feedback effects in the IllustrisTNG simulation / Rainer Weinberger, Volker Springel, Rüdiger Pakmor et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — sep. — Vol. 479, no. 3. — Pp. 4056–4072.
89. The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra / Romina Ahumada, Carlos Allende Prieto, Andrés Almeida et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2020. — jul. — Vol. 249, no. 1. — P. 3.
90. The Swift X-Ray Telescope / David N. Burrows, J. E. Hill, J. A. Nousek et al. // *Space Sci. Rev.*. — 2005. — oct. — Vol. 120, no. 3-4. — Pp. 165–195.
91. The Swift Gamma-Ray Burst Mission / N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — aug. — Vol. 611, no. 2. — Pp. 1005–1020.
92. SRGA J2306 + 1556: an extremely X-ray luminous, heavily obscured, radio-loud quasar at $z = 0.44$ discovered by SRG/ART-XC / G. S. Uskov, S. Sazonov, I. Lapshov et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2025. — jul. — Vol. 540, no. 4. — Pp. 3170–3185.
93. The Swift Ultra-Violet/Optical Telescope / Peter W. A. Roming, Thomas E. Kennedy, Keith O. Mason et al. // *Space Sci. Rev.*. — 2005. — oct. — Vol. 120, no. 3-4. — Pp. 95–142.
94. *Sunyaev R. A., Titarchuk L. G.* Comptonization of X-Rays in Plasma Clouds - Typical Radiation Spectra // *Astronomy & Astrophysics*. — 1980. — jun. — Vol. 86. — P. 121.
95. *Haardt F., Maraschi L.* A Two-Phase Model for the X-Ray Emission from Seyfert Galaxies // *The Astrophysical Journal Letters*. — 1991. — oct. — Vol. 380. — P. L51.
96. INTEGRAL view of AGN / Angela Malizia, Sergey Sazonov, Loredana Bassani et al. // *New Astronomy Review*. — 2020. — nov. — Vol. 90. — P. 101545.

97. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements: Meteoritic and solar // *Geochimica Cosmochimica Acta*. — 1989. — jan. — Vol. 53, no. 1. — Pp. 197–214.
98. *Melazzini F., Sazonov S.* What Can We Learn about Compton-Thin AGN Tori from Their X-ray Spectra? * // *Astronomy Letters*. — 2023. — jun. — Vol. 49, no. 6. — Pp. 301–319.
99. On characterizing the variability properties of X-ray light curves from active galaxies / S. Vaughan, R. Edelson, R. S. Warwick, P. Uttley // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2003. — nov. — Vol. 345, no. 4. — Pp. 1271–1284.
100. On X-Ray Variability in Seyfert Galaxies / T. J. Turner, I. M. George, K. Nandra, D. Turcan // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — oct. — Vol. 524, no. 2. — Pp. 667–673.
101. *Gehrels N.* Confidence Limits for Small Numbers of Events in Astrophysical Data // *The Astrophysical Journal*. — 1986. — apr. — Vol. 303. — P. 336.
102. Revisiting the Dust Torus Size–Luminosity Relation Based on a Uniform Reverberation-mapping Analysis / Amit Kumar Mandal, Jong-Hak Woo, Shu Wang et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2024. — jun. — Vol. 968, no. 2. — P. 59.
103. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys / Arjun Dey, David J. Schlegel, Dustin Lang et al. // *AJ*. — 2019. — may. — Vol. 157, no. 5. — P. 168.
104. The UKIRT Hemisphere Survey: definition and J-band data release / S. Dye, A. Lawrence, M. A. Read et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — feb. — Vol. 473, no. 4. — Pp. 5113–5125.
105. Resolving the mid-infrared cores of local Seyferts / P. Gandhi, H. Horst, A. Smette et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2009. — aug. — Vol. 502, no. 2. — Pp. 457–472.
106. The subarcsecond mid-infrared view of local active galactic nuclei - II. The mid-infrared-X-ray correlation / D. Asmus, P. Gandhi, S. F. Hönig et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — nov. — Vol. 454, no. 1. — Pp. 766–803.

107. Defining the intrinsic AGN infrared spectral energy distribution and measuring its contribution to the infrared output of composite galaxies / J. R. Mullaney, D. M. Alexander, A. D. Goulding, R. C. Hickox // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — jun. — Vol. 414, no. 2. — Pp. 1082–1110.
108. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties / Gaia Collaboration, A. Vallenari, A. G. A. Brown et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — jun. — Vol. 674. — P. A1.
109. Gaia DR3 detectability of unresolved binary systems / Alfred Castro-Ginard, Zephyr Penoyre, Andrew R. Casey et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2024. — aug. — Vol. 688. — P. A1.
110. X-ray luminosity function of faint point sources in the Milky Way / S. Sazonov, M. Revnivtsev, M. Gilfanov et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2006. — apr. — Vol. 450, no. 1. — Pp. 117–128.
111. Alert Classification for the ALerCE Broker System: The Light Curve Classifier / P. Sánchez-Sáez, I. Reyes, C. Valenzuela et al. // *AJ*. — 2021. — mar. — Vol. 161, no. 3. — P. 141.
112. *Schlafly Edward F., Finkbeiner Douglas P.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — aug. — Vol. 737, no. 2. — P. 103.
113. Reddening of the BLR and NLR in AGNs from a systematic analysis of Balmer decrement / Kai-Xing Lu, Yinghe Zhao, Jin-Ming Bai, Xu-Liang Fan // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — feb. — Vol. 483, no. 2. — Pp. 1722–1730.
114. *Osterbrock Donald E., Ferland Gary J.* Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei. — 2006.
115. Data Release 1 of the Dark Energy Spectroscopic Instrument / DESI Collaboration, M. Abdul-Karim, A. G. Adame et al. // *arXiv e-prints*. — 2025. — mar. — P. arXiv:2503.14745.
116. Overview of the Instrumentation for the Dark Energy Spectroscopic Instrument / DESI Collaboration, B. Abareshi, J. Aguilar et al. // *AJ*. — 2022. — nov. — Vol. 164, no. 5. — P. 207.

117. *Gower J. F. R., Scott P. F., Wills D.* A survey of radio sources in the declination ranges -07° to 20° and 40° to 80° // *Mem. RAS.* — 1967. — jan. — Vol. 71. — P. 49.
118. The Very Large Array Low-frequency Sky Survey Redux (VLSSr) / W. M. Lane, W. D. Cotton, S. van Velzen et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2014. — may. — Vol. 440, no. 1. — Pp. 327–338.
119. The GMRT 150 MHz all-sky radio survey. First alternative data release TGSS ADR1 / H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, D. A. Frail // *Astronomy & Astrophysics.* — 2017. — feb. — Vol. 598. — P. A78.
120. The Texas Survey of Radio Sources Covering -35.5 degrees $<$ declination $<$ 71.5 degrees at 365 MHz / James N. Douglas, Frank N. Bash, F. Arakel Bozyan et al. // *AJ.* — 1996. — may. — Vol. 111. — P. 1945.
121. *Large M. I., Cram L. E., Burgess A. M.* A machine-readable release of the Molonglo Reference Catalogue of Radio Sources // *The Observatory.* — 1991. — apr. — Vol. 111. — Pp. 72–75.
122. *Gregory P. C., Condon J. J.* The 87GB Catalog of Radio Sources Covering 0 degrees $<$ delta $<$ $+75$ degrees at 4.85 GHz // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 1991. — apr. — Vol. 75. — P. 1011.
123. The GB6 Catalog of Radio Sources / P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, J. J. Condon // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 1996. — apr. — Vol. 103. — P. 427.
124. *Becker Robert H., White Richard L., Edwards Alan L.* A New Catalog of 53,522 4.85 GHz Sources // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 1991. — jan. — Vol. 75. — P. 1.
125. Discovery of Giant Radio Sources from TGSS Alternative Data Release 1: Radio, Optical, and Infrared Properties / Netai Bhukta, Souvik Manik, Sabyasachi Pal, Sushanta K. Mondal // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2024. — aug. — Vol. 273, no. 2. — P. 30.
126. The Next Generation Atlas of Quasar Spectral Energy Distributions from Radio to X-Rays / Zhaohui Shang, Michael S. Brotherton, Beverley J. Wills

- et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2011. — sep. — Vol. 196, no. 1. — P. 2.
127. The INTEGRAL High-energy Cut-off Distribution of Type 1 Active Galactic Nuclei / A. Malizia, M. Molina, L. Bassani et al. // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2014. — feb. — Vol. 782, no. 2. — P. L25.
 128. [O iii] $\lambda 5007$ and X-Ray Properties of a Complete Sample of Hard X-Ray Selected AGNs in the Local Universe / Y. Ueda, Y. Hashimoto, K. Ichikawa et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — dec. — Vol. 815, no. 1. — P. 1.
 129. Machalski J., Jamrozny M., Saikia D. J. A multifrequency study of giant radio sources - III. Dynamical age versus spectral age of the lobes of selected sources // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — may. — Vol. 395, no. 2. — Pp. 812–822.
 130. A Catalog of Bulge, Disk, and Total Stellar Mass Estimates for the Sloan Digital Sky Survey / J. Trevor Mendel, Luc Simard, Michael Palmer et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2014. — jan. — Vol. 210, no. 1. — P. 3.
 131. Stellar Population Inference with Prospector / Benjamin D. Johnson, Joel Leja, Charlie Conroy, Joshua S. Speagle // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2021. — jun. — Vol. 254, no. 2. — P. 22.
 132. Conroy Charlie, Wechsler Risa H. Connecting Galaxies, Halos, and Star Formation Rates Across Cosmic Time // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — may. — Vol. 696, no. 1. — Pp. 620–635.
 133. Kormendy John, Ho Luis C. Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies // *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2013. — aug. — Vol. 51, no. 1. — Pp. 511–653.
 134. The 105-Month Swift-BAT All-sky Hard X-Ray Survey / Kyuseok Oh, Michael Koss, Craig B. Markwardt et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2018. — марта. — Vol. 235, no. 1. — P. 4.
 135. 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. — mar. — Vol. 510, no. 4. — Pp. 4796–4807.
136. The 70 Month Swift-BAT All-sky Hard X-Ray Survey / W. H. Baumgartner, J. Tueller, C. B. Markwardt et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2013. — aug. — Vol. 207, no. 2. — P. 19.
 137. *An Tao, Baan Willem A.* The Dynamic Evolution of Young Extragalactic Radio Sources // *The Astrophysical Journal.* — 2012. — nov. — Vol. 760, no. 1. — P. 77.
 138. *Laing R. A., Riley J. M., Longair M. S.* Bright radio sources at 178 MHz : flux densities, optical identifications and the cosmological evolution of powerful radio galaxies. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 1983. — jul. — Vol. 204. — Pp. 151–187.
 139. The Chandra Survey of Extragalactic Sources in the 3CR Catalog: X-ray Emission from Nuclei, Jets, and Hotspots in the Chandra Archival Observations / F. Massaro, D. E. Harris, E. Liuzzo et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2015. — sep. — Vol. 220, no. 1. — P. 5.
 140. Completing the 3CR Chandra Snapshot Survey: Extragalactic Radio Sources at High Redshift / A. Jimenez-Gallardo, F. Massaro, M. A. Prieto et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2020. — sep. — Vol. 250, no. 1. — P. 7.
 141. Beyond Simple AGN Unification with Chandra-observed 3CRR Sources at $0.5 < z < 1$ / Joanna Kuraszkiewicz, Belinda J. Wilkes, Adam Atanas et al. // *The Astrophysical Journal.* — 2021. — jun. — Vol. 913, no. 2. — P. 134.
 142. Atlas of Quasar Energy Distributions / Martin Elvis, Belinda J. Wilkes, Jonathan C. McDowell et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 1994. — nov. — Vol. 95. — P. 1.
 143. *Vasudevan R. V., Fabian A. C.* Piecing together the X-ray background: bolometric corrections for active galactic nuclei // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2007. — nov. — Vol. 381, no. 3. — Pp. 1235–1251.

144. Broad-band study of hard X-ray-selected absorbed active galactic nuclei / A. de Rosa, F. Panessa, L. Bassani et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — mar. — Vol. 420, no. 3. — Pp. 2087–2101.
145. Masses and accretion rates of supermassive black holes in active galactic nuclei from the INTEGRAL survey / G. A. Khorunzhev, S. Yu. Sazonov, R. A. Burenin, A. Yu. Tkachenko // *Astronomy Letters*. — 2012. — aug. — Vol. 38, no. 8. — Pp. 475–491.
146. *Prokhorenko S. A., Sazonov S. Yu.* The Growth Rate of Supermassive Black Holes and Its Dependence on the Stellar Mass of Galaxies at the Present Epoch // *Astronomy Letters*. — 2021. — aug. — Vol. 47, no. 8. — Pp. 515–533.
147. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1973. — jan. — Vol. 24. — Pp. 337–355.
148. A combined optical and X-ray study of unobscured type 1 active galactic nuclei - I. Optical spectra and spectral energy distribution modelling / Chichuan Jin, Martin Ward, Chris Done, Jonathan Gelbord // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — mar. — Vol. 420, no. 3. — Pp. 1825–1847.
149. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog: Sixteenth Data Release / Brad W. Lyke, Alexandra N. Higley, J. N. McLane et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2020. — sep. — Vol. 250, no. 1. — P. 8.
150. Spectral Energy Distributions and Multiwavelength Selection of Type 1 Quasars / Gordon T. Richards, Mark Lacy, Lisa J. Storrie-Lombardi et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2006. — oct. — Vol. 166, no. 2. — Pp. 470–497.
151. Exploratory X-Ray Monitoring of Luminous Radio-quiet Quasars at High Redshift: Initial Results / Ohad Shemmer, W. N. Brandt, Maurizio Paolillo et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — mar. — Vol. 783, no. 2. — P. 116.
152. The H I Content of the Universe Over the Past 10 GYRS / Marcel Neeleman, J. Xavier Prochaska, Joseph Ribaudo et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — feb. — Vol. 818, no. 2. — P. 113.

153. *Green R. F., Schmidt M., Liebert J.* The Palomar-Green Catalog of Ultraviolet-Excess Stellar Objects // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1986. — jun. — Vol. 61. — P. 305.
154. X-Ray Observations of the Bright Quasar Survey / H. Tananbaum, Y. Avni, R. F. Green et al. // *The Astrophysical Journal*. — 1986. — jun. — Vol. 305. — P. 57.
155. Mean Spectral Energy Distributions and Bolometric Corrections for Luminous Quasars / Coleman M. Krawczyk, Gordon T. Richards, Sajjan S. Mehta et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2013. — may. — Vol. 206, no. 1. — P. 4.
156. Observational Constraints on the Dependence of Radio-Quiet Quasar X-Ray Emission on Black Hole Mass and Accretion Rate / Brandon C. Kelly, Jill Bechtold, Jonathan R. Trump et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2008. — jun. — Vol. 176, no. 2. — Pp. 355–373.
157. XMM-Newton observatory. I. The spacecraft and operations / F. Jansen, D. Lumb, B. Altieri et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2001. — jan. — Vol. 365. — Pp. L1–L6.
158. The XMM-Newton view of PG quasars. I. X-ray continuum and absorption / E. Piconcelli, E. Jimenez-Bailón, M. Guainazzi et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — mar. — Vol. 432, no. 1. — Pp. 15–30.
159. *Elvis Martin, Lockman Felix J., Wilkes Belinda J.* Accurate Galactic N(H) Values Toward Quasars and AGN // *AJ*. — 1989. — mar. — Vol. 97. — P. 777.
160. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements: Meteoritic and solar // *Geochimica Cosmochimica Acta*. — 1989. — jan. — Vol. 53, no. 1. — Pp. 197–214.
161. X-ray spectra of two quasars at $z \sim 1$ / K. Nandra, A. C. Fabian, W. N. Brandt et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1995. — sep. — Vol. 276, no. 1. — Pp. 1–8.
162. X-Ray Observations of Optically Selected, Radio-quiet Quasars. I. The ASCA Results / I. M. George, T. J. Turner, T. Yaqoob et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — mar. — Vol. 531, no. 1. — Pp. 52–80.

163. XMM-Newton observations of high-luminosity radio-quiet quasi-stellar objects / K. L. Page, J. N. Reeves, P. T. O'Brien et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2004. — sep. — Vol. 353, no. 1. — Pp. 133–142.
164. The XMM-Newton view of PG quasars. II. Properties of the Fe K $_{\alpha}$ line / E. Jiménez-Bailón, E. Piconcelli, M. Guainazzi et al. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — may. — Vol. 435, no. 2. — Pp. 449–457.
165. Energy Distribution of Individual Quasars from Far-Ultraviolet to X-Rays. I. Intrinsic Ultraviolet Hardness and Dust Opacities / Sinhué A. R. Haro-Corzo, Luc Binette, Yair Krongold et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — jun. — Vol. 662, no. 1. — Pp. 145–165.
166. *Park Taeyoung, van Dyk David A., Siemiginowska Aneta*. Searching for Narrow Emission Lines in X-ray Spectra: Computation and Methods // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — dec. — Vol. 688, no. 2. — Pp. 807–825.
167. X-ray variability of SDSS quasars based on the SRG/eROSITA all-sky survey / S. A. Prokhorenko, S. Yu Sazonov, M. R. Gilfanov et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — mar. — Vol. 528, no. 4. — Pp. 5972–5989.
168. *George I. M., Fabian A. C.* X-ray reflection from cold matter in Active Galactic Nuclei and X-ray binaries. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1991. — mar. — Vol. 249. — P. 352.
169. *Miller J. M.* Relativistic X-Ray Lines from the Inner Accretion Disks Around Black Holes // *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — sep. — Vol. 45, no. 1. — Pp. 441–479.
170. *Nayakshin Sergei, Kazanas Demosthenes, Kallman Timothy R.* Thermal Instability and Photoionized X-Ray Reflection in Accretion Disks // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — jul. — Vol. 537, no. 2. — Pp. 833–852.
171. *Ross R. R., Fabian A. C.* A comprehensive range of X-ray ionized-reflection models // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2005. — mar. — Vol. 358, no. 1. — Pp. 211–216.

172. The Hard X-Ray Spectrum as a Probe for Black Hole Growth in Radio-Quiet Active Galactic Nuclei / Ohad Shemmer, W. N. Brandt, Hagai Netzer et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — jul. — Vol. 682, no. 1. — Pp. 81–93.
173. A statistical relation between the X-ray spectral index and Eddington ratio of active galactic nuclei in deep surveys / M. Brightman, J. D. Silverman, V. Mainieri et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — aug. — Vol. 433, no. 3. — Pp. 2485–2496.
174. BAT AGN Spectroscopic Survey (BASS) - VI. The Γ_X -L/ L_{Edd} relation / Benny Trakhtenbrot, Claudio Ricci, Michael J. Koss et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — sep. — Vol. 470, no. 1. — Pp. 800–814.

Приложение А

Спектральные особенности источников

Таблица А.1 — Спектральные особенности источников. Длины волн приведены в системе наблюдателя, а эквивалентные ширины линий (EW) – в системе покоя источников. Доверительные интервалы приведены на уровне значимости 1σ , а верхние пределы на уровне 2σ

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	$FWHM$ 10^2 км/с
Выборка №1				
SRGAJ043209.6+354917				
$H\beta$, узкая	5112	< 5	> -4.3	–
$H\beta$, широкая	5112	79 ± 19	-64 ± 16	58 ± 6
OIII λ 4960		< 7	> -6.5	–
OIII λ 5007	5260	28 ± 5	-27 ± 5	6.4 ± 1.2
NIII λ 6548	6854	2 ± 2	-2 ± 2	5.8 ± 0.9
$H\alpha$, узкая	6893	9 ± 2	-9 ± 2	5.8 ± 0.9
$H\alpha$, широкая	6893	281 ± 8	-278 ± 8	60 ± 2
NIII λ 6584	6919	14 ± 2	-14 ± 2	5.8 ± 0.9
SRGAJ045049.8+301449				
$H\beta$	5037	< 2	> -1.3	–
OIII λ 4960	5124	5.9 ± 0.8	-3.7 ± 0.5	6.5 ± 0.6
OIII λ 5007	5173	16.6 ± 1.9	-10.3 ± 1.2	6.8 ± 0.6
$H\alpha$, узкая	6781	13 ± 4	-7 ± 2	4.7 ± 0.5
$H\alpha$, широкая	6781	13 ± 2	-7.1 ± 1.2	28 ± 4
NIII λ 6584	6803	11.5 ± 1.6	-6.7 ± 0.9	4.8 ± 0.5
SIII λ 6718	6940	7.5 ± 1.0	-4.2 ± 0.6	5.2 ± 0.8
SIII λ 6732	6956	5.0 ± 1.0	-2.7 ± 0.6	4.8 ± 0.8
SRGAJ152102.3+320418				
OIII λ 3729	4155	13.5 ± 0.8	$-1.8^{+1.7}_{-0.8}$	6.8 ± 0.8
HeIII λ 3889	4312	3.9 ± 0.8	-9^{+9}_{-4}	6.2 ± 0.8
$H\delta$	4573	< 1.3	> -27	–
$H\gamma$	4837	1.6 ± 0.2	-31^{+12}_{-6}	6.7 ± 0.7
OIII λ 4364	4863	0.83 ± 0.17	$-15.4^{+1.2}_{-2.7}$	6.3 ± 0.7
$H\beta$	5418	3.4 ± 0.3	-67^{+24}_{-13}	5.7 ± 0.6
OIII λ 4960	5527	8.5 ± 0.3	$-1.23^{+0.45}_{-0.11}$	6.1 ± 0.6

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
OII λ 5007	5580	26.2 ± 1.1	-3.6 ± 0.4	6.3 ± 0.6
OII λ 6302	7022	1.64 ± 0.08	-41_{-7}^{+8}	6.1 ± 0.5
OII λ 6365	7086	< 0.8	> -7.6	—
NI λ 6548	7298	< 2	> -22	—
H α	7316	32.9 ± 1.1	$-2.4_{-0.7}^{+0.8}$	5.6 ± 0.4
NI λ 6584	7339	8.0 ± 0.4	-56_{-28}^{+29}	7.2 ± 0.8
SII λ 6718	7487	6.8 ± 0.8	-58 ± 8	5.9 ± 0.4
SII λ 6732	7504	5.8 ± 0.8	-50 ± 8	5.8 ± 0.4
SRGAJ200431.6+610211				
H β	5147	2.81 ± 0.19	-6.7 ± 0.5	4.7 ± 0.7
OII λ 4959	5250	8.8 ± 0.8	-19 ± 4	4.8 ± 0.7
OII λ 5007	5302	30.1 ± 1.1	-59 ± 3	4.8 ± 0.7
H α	6950	15.0 ± 1.5	-23 ± 2	4.7 ± 0.5
NI λ 6584	6972	15.1 ± 1.5	-23 ± 2	5.0 ± 0.5
SII λ 6718	7113	4.2 ± 0.4	-7.7 ± 0.6	5.5 ± 0.4
SII λ 6732	7129	4.2 ± 0.4	-7.7 ± 0.6	5.2 ± 0.4
SRGAJ224125.9+760343				
H γ , узкая	5579	< 0.15	> -1.2	—
H γ , широкая	5579	3.28 ± 0.15	-26 ± 1	21 ± 2
FeII λ 4570	5982	3.3 ± 0.2	—	—
H β , узкая	6239	0.77 ± 0.05	-6.4 ± 0.4	3.8 ± 0.9
H β , широкая	6239	8.93 ± 0.18	-35 ± 2	15 ± 2
OII λ 4959	6365	1.33 ± 0.03	-11.3 ± 0.3	3.7 ± 0.9
OII λ 5007	6428	3.45 ± 0.05	-29 ± 1	3.7 ± 0.9
H α , узкая	8429	0.85 ± 0.13	-8.8 ± 1.3	2.8 ± 0.7
H α , широкая	8429	28.0 ± 0.4	-288 ± 5	23 ± 1.0
SRGAJ232446.8+440756				
H β	5087	5.9 ± 0.9	-12 ± 3	7.4 ± 1.0
OII λ 4959	5189	15.8 ± 1.9	-42 ± 9	6.8 ± 1.0
OII λ 5007	5239	41 ± 3	-102 ± 17	7.3 ± 1.0
H α	6865	23.1 ± 1.6	-41 ± 6	5.3 ± 0.8
NI λ 6584	6887	7.9 ± 1.2	-17 ± 3	$1.5_{-1.5}^{+3.7}$
Выборка №2				
SRGAJ025234.3+431004				
H β	5109	2.3 ± 0.6	-11.5 ± 3.0	—
[OII] λ 4959	5212	8.5 ± 0.6	-44 ± 3	—
[OII] λ 5007	5262	22.10 ± 0.12	-117 ± 4	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[NII]λ6548	6884	1.4 ± 0.4	-5.9 ± 1.4	—
<i>Hα</i>	6900	10.9 ± 0.5	-46 ± 2	—
[NII]λ6584	6923	6.2 ± 0.5	-27 ± 2	—
[SII]λ6718	7061	3.0 ± 0.6	-13.2 ± 2.6	—
[SII]λ6732	7075	3.7 ± 0.7	-16.0 ± 3.1	—
SRGAJ062627.2+072734				
<i>Hβ</i> , узкая	5077	< 1.6	> -2.5	—
<i>Hβ</i> , широкая	5077	42 ± 3	-64 ± 4	54 ± 4
[OIII]λ4959	5173	6.6 ± 1.0	-10.1 ± 1.3	—
[OIII]λ5007	5224	15.9 ± 1.0	-24 ± 1	—
[NII]λ6548	6826	6.1 ± 1.0	-10.4 ± 1.6	—
<i>Hα</i> , широкая	6841	177 ± 3	-297 ± 5	53 ± 1
<i>Hα</i> , узкая	6841	8.1 ± 1.0	-13.2 ± 1.6	—
[NII]λ6584	6859	7.4 ± 1.0	-12.2 ± 1.6	—
[SII]λ6718	7002	1.6 ± 0.6	-2.7 ± 1.0	—
[SII]λ6732	7017	1.5 ± 0.6	-2.8 ± 0.8	—
SRGAJ070636.4+635109				
<i>Hβ</i>	4930	< 1.1	> -0.5	—
[OIII]λ4959	5027	2.5 ± 0.8	-1.2 ± 0.4	—
[OIII]λ5007	5076	5.0 ± 0.9	-2.4 ± 0.4	—
[NII]λ6548	6640	2.5 ± 0.6	-1.0 ± 0.2	—
<i>Hα</i>	6657	4.5 ± 0.7	-1.8 ± 0.3	—
<i>Hα</i> , широкая	6657	69 ± 5	-28 ± 2	61 ± 4
[NII]λ6584	6676	11.58 ± 0.10	-4.7 ± 0.3	—
[SII]λ6718	6811	2.5 ± 0.5	-1.0 ± 0.2	—
[SII]λ6732	6826	4.1 ± 0.7	-1.6 ± 0.3	—
SRGAJ092021.6+860249				
<i>Hγ</i> , узкая	4581	< 3	> -1.6	—
<i>Hγ</i> , широкая	4581	26 ± 6	-14.3 ± 3.0	32 ± 7
<i>Hβ</i> , узкая	5121	2.7 ± 1.4	-1.1 ± 0.5	—
<i>Hβ</i> , широкая	5121	57 ± 3	-30 ± 2	28 ± 2
[OIII]λ4959	5222	5.4 ± 1.4	-2.8 ± 0.5	—
[OIII]λ5007	5272	17.6 ± 1.4	-9.0 ± 0.4	—
[NII]λ6548	6894	< 9	> -4.3	—
<i>Hα</i> , узкая	6910	< 19	> -9.9	—
<i>Hα</i> , широкая	6910	131 ± 20	-70 ± 11	14.9 ± 0.6
[NII]λ6584	6931	26 ± 7	-13.8 ± 3.8	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[SII] λ 6718	7072	2.3 ± 0.5	-1.5 ± 0.3	—
[SII] λ 6732	7086	2.0 ± 0.4	-1.2 ± 0.3	—
SRGAJ195702.4+615036				
$H\beta$, узкая	5146	9 ± 4	-1.7 ± 0.7	—
$H\beta$, широкая	5146	68 ± 9	-12.5 ± 1.7	35 ± 5
[OIII] λ 4959	5249	74 ± 4	-13.7 ± 0.6	—
[OIII] λ 5007	5299	194 ± 3	-36 ± 1	—
[OI] λ 6300	6671	15.0 ± 1.3	-2.9 ± 0.3	—
[NII] λ 6548	6935	27 ± 9	-5.5 ± 1.7	—
$H\alpha$, узкая	6950	48 ± 12	-10.0 ± 2.5	—
$H\alpha$, широкая	6950	445 ± 37	-92 ± 6	27 ± 2
[NII] λ 6584	6970	85 ± 10	-17.6 ± 2.2	—
[SII] λ 6718	7111	27 ± 4	-5.8 ± 0.7	—
[SII] λ 6732	7126	25 ± 4	-5.4 ± 0.7	—
SRGAJ221913.2+362014				
$H\beta$	5572	4.3 ± 0.3	-23 ± 2	—
[OIII] λ 4959	5686	25.1 ± 0.4	-135 ± 2	—
[OIII] λ 5007	5741	74.2 ± 1.5	-403 ± 2	—
[OI] λ 6300	7225	2.0 ± 0.3	-13.8 ± 2.2	—
[NII] λ 6548	7505	0.26 ± 0.13	-12.4 ± 2.7	—
$H\alpha$	7526	23.4 ± 1.0	-132 ± 8	—
[NII] λ 6584	7550	6.1 ± 0.4	-35 ± 4	—
[SII] λ 6718	7702	6.4 ± 1.2	-56 ± 10	—
[SII] λ 6732	7722	3.0 ± 1.2	-26 ± 10	—
SRGAJ223714.9+402939				
$H\beta$, узкая	5144	< 4	> -4.6	—
$H\beta$, широкая	5144	140 ± 14	-73 ± 8	161 ± 18
[OIII] λ 4959	5247	18 ± 2	-9.5 ± 1.3	—
[OIII] λ 5007	5298	58 ± 2	-31 ± 2	—
[OI] λ 6300	6668	5.1 ± 1.2	-2.8 ± 0.7	—
[NII] λ 6548	6929	10.0 ± 1.7	-5.3 ± 1.0	5.4 (фикс)
$H\alpha$, узкая	6945	28.2 ± 1.7	-15.5 ± 1.1	—
$H\alpha$, широкая	6945	291 ± 17	-164 ± 9	97 ± 5
[NII] λ 6584	6967	29.8 ± 1.7	-16.7 ± 1.2	—
[SII] λ 6718	7109	8.2 ± 1.6	-4.5 ± 0.6	—
[SII] λ 6732	7124	8.1 ± 1.6	-4.8 ± 0.6	—
SRGAJ232037.8+482329				

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
$H\beta$	5062	1.6 ± 0.6	-1.2 ± 0.5	—
[OIII] λ 4959	5164	7.3 ± 0.7	-5.6 ± 0.5	—
[OIII] λ 5007	5213	16.4 ± 0.7	-12.7 ± 0.6	—
[OI] λ 6300	6563	3.8 ± 0.5	-3.2 ± 0.4	—
[NII] λ 6548	6819	5.7 ± 0.4	-5.0 ± 0.4	—
$H\alpha$	6836	14.5 ± 0.5	-12.9 ± 0.5	—
[NII] λ 6584	6857	12.7 ± 0.5	-11.4 ± 0.4	—
[SII] λ 6718	6997	4.0 ± 0.4	-3.8 ± 0.4	—
[SII] λ 6732	7012	3.6 ± 0.4	-3.5 ± 0.4	—
SRGAJ235250.6-170449				
$H\beta$, узкая	5129	4.0 ± 0.6	-4.4 ± 0.6	—
$H\beta$, широкая	5129	78 ± 3	-85 ± 4	112 ± 5
[OIII] λ 4959	5231	8.8 ± 0.6	-9.6 ± 0.7	—
[OIII] λ 5007	5282	21.9 ± 0.6	-24 ± 1	—
[OI] λ 6302	6648	4.3 ± 0.7	-4.7 ± 0.7	—
[NII] λ 6548	6909	1.2 ± 0.8	-1.4 ± 1.0	—
$H\alpha$, узкая	6925	16.8 ± 0.9	-20 ± 1	—
$H\alpha$, широкая	6925	408 ± 4	-493 ± 6	93 ± 2
[NII] λ 6584	6946	1.4 ± 0.7	-1.7 ± 0.9	—
[SII] λ 6718	7089	2.2 ± 0.8	-2.8 ± 0.9	—
[SII] λ 6732	7105	2.8 ± 0.7	-3.6 ± 0.9	—
SRGAJ030838.1-552041				
$H\beta$	—	—	-3.2 ± 1.3	2.8 ± 1.1
[OIII] λ 4959	—	—	-12.6 ± 4.0	3.5 ± 1.1
[OIII] λ 5007	—	—	-41 ± 7	3.5 ± 0.3
[NII] λ 6548	—	—	$-4.3^{+3.0}_{-2.4}$	3.5 ± 1.3
$H\alpha$	—	—	-18.6 ± 2.0	4.2 ± 0.4
[NII] λ 6584	—	—	-14.3 ± 3.2	3.7 ± 0.5
[SII] λ 6717	—	—	-5.0 ± 1.6	4.1 ± 1.7
[SII] λ 6730	—	—	-4.6 ± 1.6	3.9 ± 1.7
SRGAJ052959.8-340157				
[OII] λ 3727	—	—	-16.6 ± 4.9	5.8 ± 0.9
$H\beta$	—	—	-4.6 ± 1.8	6.0 ± 1.7
[OIII] λ 4959	—	—	-21 ± 4	6.9 ± 0.6
[OIII] λ 5007	—	—	-65 ± 9	6.3 ± 0.6
[NII] λ 6548	—	—	-4.1 ± 0.9	6.3 ± 0.3
$H\alpha$, узкая	—	—	-20.6 ± 0.9	6.3 ± 0.3

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
$H\alpha$, широкая		—	-62 ± 5	72 ± 6
[NII] $\lambda 6584$		—	-16.2 ± 0.9	6.3 ± 0.3
SRGAJ055053.7-621457				
$H\delta$, широкая		—	-17.5 ± 1.9	32 ± 4
$H\gamma$, широкая		—	-16.2 ± 1.2	22 ± 2
$H\beta$, узкая		—	< 1.9	-
$H\beta$, широкая		—	-38 ± 2	24 ± 2
[OIII] $\lambda 4959$		—	-6.3 ± 2.2	6.7 ± 1.6
[OIII] $\lambda 5007$		—	-21 ± 2	6.7 ± 0.6
$H\alpha$, узкая		—	-6.4 ± 2.8	5.6 ± 0.8
$H\alpha$, широкая		—	-90 ± 5	20 ± 1
[NII] $\lambda 6584$		—	-12.8 ± 2.4	5.5 ± 0.8
SRGAJ060241.1-595152				
$H\beta$		—	-6.7 ± 2.3	3.1 ± 0.8
[OIII] $\lambda 4959$		—	-14.0 ± 3.7	4.4 ± 0.5
[OIII] $\lambda 5007$		—	-49 ± 11	3.7 ± 0.4
$H\alpha$		—	-19^{+9}_{-18}	4.9 ± 1.7
[NII] $\lambda 6584$		—	-14^{+7}_{-14}	4.9 ± 1.7
SRGAJ061322.9-290027				
$H\beta$		—	-3.1 ± 1.2	4.1 ± 1.5
[OIII] $\lambda 4959$		—	-8.2 ± 2.8	5.6 ± 1.3
[OIII] $\lambda 5007$		—	-25 ± 5	5.1 ± 0.5
[OI] $\lambda 6300$		—	-5.2 ± 1.9	6.3 ± 1.3
[NII] $\lambda 6548$		—	-7.9 ± 2.4	6.1 ± 0.8
$H\alpha$		—	-16.8 ± 2.4	6.1 ± 0.8
[NII] $\lambda 6584$		—	-21 ± 3	6.0 ± 0.8
[SII] $\lambda 6717$		—	$-5.4^{+1.6}_{-3.0}$	5.4 ± 2.1
[SII] $\lambda 6730$		—	-8.2 ± 3.1	7.6 ± 2.0
SRGAJ063324.9-561424				
[OIII] $\lambda 4959$		—	$-7.8^{+3.6}_{-5.4}$	3.0 ± 1.2
[OIII] $\lambda 5007$		—	-29^{+10}_{-27}	3.0 ± 1.2
[NII] $\lambda 6548$		—	-11.8 ± 3.8	4.2 ± 1.4
$H\alpha$		—	-23^{+6}_{-16}	4.2 ± 1.4
[NII] $\lambda 6584$		—	-15.3 ± 4.9	4.2 ± 1.4
SRGAJ064421.5-662620				
$H\gamma$		—	-2.9 ± 0.9	3.7 ± 1.7
[OII] $\lambda 3727$		—	-14.4 ± 4.8	7.6 ± 1.6

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
$H\beta$, узкая		—	-5.2 ± 1.4	2.9 ± 1.6
$H\beta$, широкая		—	-35 ± 2	58 ± 4
[OIII] λ 4959		—	-8.6 ± 1.8	4.0 ± 0.9
[OIII] λ 5007		—	-31 ± 6	4.7 ± 0.8
$H\alpha$, узкая		—	-22 ± 1	2.8 ± 0.2
$H\alpha$, широкая		—	-130 ± 4	40 ± 2
[NII] λ 6584		—	-12.2 ± 0.8	2.8 ± 0.2
SRGAJ072823.5-440823				
$H\gamma$, широкая		—	-24 ± 2	32 ± 3
$H\beta$, узкая		—	< 1.4	—
$H\beta$, широкая		—	-55 ± 2	34 ± 2
[OIII] λ 4959		—	$-4.7^{+1.1}_{-3.4}$	4.6 ± 1.6
[OIII] λ 5007		—	-20^{+4}_{-6}	4.3 ± 0.9
$H\alpha$, узкая		—	-12.5 ± 2.7	5.0 ± 0.8
$H\alpha$, широкая		—	-210 ± 5	30 ± 1
[NII] λ 6584		—	-5.4 ± 1.8	5.0 ± 0.8
Выборка №3				
SRGA J001439.6+183503				
$H\alpha$	6681	1.4 ± 0.3	-0.81 ± 0.20	—
[NII] λ 6583	6701	3.8 ± 0.4	-2.24 ± 0.25	—
SRGA J002240.8+804348				
$H\gamma$, широкая	4847	9.3 ± 2.0	-16 ± 5	46 ± 9
$H\beta$, широкая	5440	35.6 ± 1.7	-48.1 ± 2.5	89 ± 5
$H\beta$	5440	< 0.7	> -0.9	—
[OIII] λ 4959	5524	1.0 ± 0.4	-1.4 ± 0.5	—
[OIII] λ 5007	5577	2.6 ± 0.5	-3.5 ± 0.7	—
$H\alpha$, широкая	7316	128.8 ± 2.1	-221 ± 4	72.1 ± 1.2
SRGA J010742.9+574419				
$H\beta$	5200	1.7 ± 0.4	-3.4 ± 1.1	—
[OIII] λ 4959	5304	1.4 ± 0.4	-2.9 ± 0.8	—
[OIII] λ 5007	5356	5.4 ± 0.5	-11.2 ± 1.2	—
[NII] λ 6548	7007	0.56 ± 0.24	-0.8 ± 0.7	—
$H\alpha$, широкая	7023	70.9 ± 2.0	-140 ± 6	37.5 ± 1.2
$H\alpha$	7023	8.4 ± 1.0	-17 ± 4	—
[NII] λ 6583	7045	1.67 ± 0.24	-2.3 ± 2.0	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
SRGA J021227.3+520953				
$H\beta$, широкая	6018	11.8 ± 0.7	-51 ± 3	58 ± 4
$H\beta$	6018	0.80 ± 0.20	-3.5 ± 0.9	—
[OII] λ 4959	6140	2.14 ± 0.16	-9.5 ± 0.8	—
[OII] λ 5007	6200	5.96 ± 0.20	-27.0 ± 1.0	—
[NII] λ 6548	8105	0.37 ± 0.08	-1.14 ± 0.24	—
$H\alpha$, широкая	8116	79.8 ± 0.8	-244 ± 4	38.7 ± 0.4
$H\alpha$	8124	2.75 ± 0.26	-8.4 ± 0.8	—
[NII] λ 6583	8149	1.11 ± 0.08	-3.4 ± 0.7	—
[SII] λ 6716	8316	0.55 ± 0.14	-1.8 ± 0.5	—
[SII] λ 6730	8333	0.58 ± 0.14	-1.9 ± 0.5	—
SRGA J025208.4+482955				
$H\beta$	5026	1.3 ± 0.3	-1.9 ± 0.5	—
[OII] λ 4959	5127	8.4 ± 0.4	-11.9 ± 0.5	—
[OII] λ 5007	5176	22.6 ± 0.5	-31.9 ± 0.7	—
[OI] λ 6300	6513	1.27 ± 0.22	-1.6 ± 0.3	—
[NII] λ 6548	6769	2.3 ± 0.3	-2.9 ± 0.4	—
$H\alpha$, широкая	6784	26.8 ± 1.2	-33.9 ± 1.6	41.7 ± 2.4
$H\alpha$	6784	8.4 ± 0.4	-10.6 ± 0.6	—
[NII] λ 6583	6804	7.4 ± 0.4	-9.3 ± 0.5	—
[SII] λ 6716	6942	2.34 ± 0.23	-2.99 ± 0.29	—
[SII] λ 6730	6957	2.20 ± 0.22	-2.81 ± 0.29	—
SRGA J045432.1+524003				
$H\beta$	5015	5.8 ± 1.7	-5.1 ± 1.5	—
[OII] λ 4959	5114	29.5 ± 1.7	-25.5 ± 1.5	—
[OII] λ 5007	5163	88.3 ± 2.2	-76.1 ± 2.5	—
[OI] λ 6300	6498	5.7 ± 0.8	-3.8 ± 0.5	—
[NII] λ 6548	6754	17.0 ± 0.5	-11.3 ± 0.4	—
$H\alpha$	6769	28.3 ± 1.3	-19.0 ± 0.9	—
$H\alpha$, широкая	6769	52 ± 3	-35 ± 2	41 ± 3
[NII] λ 6583	6789	50.9 ± 0.5	-34.1 ± 1.0	—
[SII] λ 6716	6927	8.9 ± 0.7	-6.0 ± 0.5	—
[SII] λ 6730	6942	10.7 ± 0.7	-7.2 ± 0.5	—
SRGA J051313.5+662747				
$H\beta$	4933	8.0 ± 0.8	-4.3 ± 0.4	—
[OII] λ 4959	5033	23.0 ± 0.8	-12.3 ± 0.5	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[OIII]λ5007	5081	64 ± 1	-34.1 ± 0.6	—
[OI]λ6300	6394	3.8 ± 0.5	-1.78 ± 0.23	—
[NII]λ6548	6645	12.6 ± 0.6	-5.80 ± 0.24	—
$H\alpha$	6660	43.8 ± 0.7	-20.1 ± 0.3	—
[NII]λ6583	6681	38.8 ± 0.7	-17.8 ± 0.4	—
[SII]λ6716	6816	13.0 ± 0.6	-5.90 ± 0.26	—
[SII]λ6730	6831	11.8 ± 0.6	-5.38 ± 0.29	—
SRGA J110945.8+800815				
[OII]λ3727	4432	2.3 ± 0.4	-27 ± 6	—
$H\beta$	5779	0.52 ± 0.17	-3.2 ± 0.9	—
[OIII]λ4959	5896	1.91 ± 0.26	-11.2 ± 1.5	—
[OIII]λ5007	5952	5.37 ± 0.24	-31.4 ± 1.7	—
[OI]λ6300	7488	0.91 ± 0.19	-5.1 ± 1.1	—
[NII]λ6548	7781	1.35 ± 0.24	-7.4 ± 1.4	—
$H\alpha$	7802	3.30 ± 0.27	-17.6 ± 1.5	—
[NII]λ6583	7826	3.28 ± 0.25	-17.5 ± 1.4	—
[SII]λ6716	7980	1.04 ± 0.24	-5.6 ± 1.1	—
[SII]λ6730	8001	0.99 ± 0.24	-5.2 ± 1.1	—
SRGA J161251.4–052100				
$H\alpha$			-3.8 ± 1.7	—
[NII]λ6548			-2.4 ± 0.6	—
[NII]λ6583			-7.2 ± 1.9	—
$H\beta$			> -1.4	—
[OIII]λ4959			-3.8 ± 0.7	—
[OIII]λ5007			-10.3 ± 0.9	—
SRGA J161943.7–132609				
$H\alpha$			> -2.7	—
$H\alpha$, широкая			-87 ± 7	40.5 ± 2.7
[NII]λ6548			> -0.8	—
[NII]λ6583			-1.1 ± 1.1	—
$H\beta$			> -1.3	—
[OIII]λ4959			-3.7 ± 0.7	—
[OIII]λ5007			-9.5 ± 0.9	—
SRGA J182109.8+765819				
$H\beta$	5168	< 0.4	> -0.8	—
[OIII]λ4959	5269	1.62 ± 0.22	-3.1 ± 0.4	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[OII]λ5007	5321	3.73 ± 0.25	-7.0 ± 0.4	—
[OI]λ6300	6698	0.38 ± 0.14	-0.69 ± 0.22	—
[NII]λ6548	6963	1.18 ± 0.15	-2.08 ± 0.24	—
$H\alpha$	6979	2.48 ± 0.17	-4.37 ± 0.29	—
[NII]λ6583	7001	3.46 ± 0.17	-6.1 ± 0.3	—
[SII]λ6716	7143	1.10 ± 0.14	-2.07 ± 0.27	—
[SII]λ6730	7157	0.83 ± 0.14	-1.59 ± 0.25	—
SRGA J193707.6+660816				
$H\delta$, широкая	4397	12.2 ± 1.8	-23 ± 3	23.5 ± 2.0
$H\gamma$, широкая	4655	17.5 ± 1.5	-28.0 ± 2.6	22.2 ± 1.9
$H\beta$, широкая	5207	29.4 ± 1.3	-40.9 ± 2.1	23.3 ± 1.2
$H\beta$	5207	3.1 ± 0.6	-4.3 ± 1.0	—
[OIII]λ4959	5313	10.4 ± 0.4	-14.7 ± 0.7	—
[OIII]λ5007	5364	31.5 ± 0.6	-44.9 ± 1.1	—
[NII]λ6548	7016	1.64 ± 0.25	-2.6 ± 0.4	—
$H\alpha$, широкая	7032	115.1 ± 2.5	-185 ± 6	21.5 ± 0.4
$H\alpha$	7032	15.0 ± 1.3	-24.1 ± 2.7	—
[NII]λ6583	7053	4.93 ± 0.25	-8.1 ± 1.1	—
[SII]λ6716	7197	3.0 ± 0.5	-5.4 ± 0.8	—
[SII]λ6730	7212	2.1 ± 0.4	-3.8 ± 0.9	—
SRGA J200331.2+701332				
$H\beta$, широкая	5362	24.1 ± 2.3	-60 ± 7	103 ± 11
$H\beta$	5362	< 0.8	> -2.1	—
[OIII]λ4959	5445	1.4 ± 0.4	-3.6 ± 1.0	—
[OIII]λ5007	5496	6.2 ± 0.5	-15.5 ± 1.4	—
[NII]λ6548	7200	0.7 ± 0.4	-1.9 ± 1.5	—
$H\alpha$, широкая	7216	85 ± 3	-230 ± 13	82 ± 3
$H\alpha$	7216	< 1.1	> -2.9	—
[NII]λ6583	7239	2.2 ± 0.4	-6 ± 4	—
SRGA J211149.5+722815				
$H\beta$	5377	< 0.9	> -4	—
[OIII]λ4959	5486	3.0 ± 0.5	-13.2 ± 2.3	—
[OIII]λ5007	5537	7.8 ± 0.6	-33 ± 3	—
[NII]λ6548	7225	1.1 ± 0.6	-5.1 ± 2.0	—
$H\alpha$	7252	5.5 ± 0.8	-12 ± 3	—
[NII]λ6583	7279	8.7 ± 0.9	-21 ± 3	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[SII]λ6716	7430	2.4 ± 0.7	-5.6 ± 1.6	—
[SII]λ6730	7450	1.4 ± 0.6	-3.9 ± 1.3	—
Выборка №4				
SRGA J000132.9+240237				
[NeV]3346	3696	0.60 ± 0.05	-5.6 ± 0.5	—
[NeVI]3426	3784	1.57 ± 0.05	-15.6 ± 0.5	—
[OII]3726	4118	4.68 ± 0.06	-45.7 ± 0.6	—
HeI 3888	4296	0.31 ± 0.02	-2.7 ± 0.2	—
[SII]4071	4495	0.19 ± 0.02	-1.47 ± 0.18	—
Hδ	4531	0.38 ± 0.02	-2.82 ± 0.18	—
Hγ	4795	1.31 ± 0.04	-8.3 ± 0.2	—
[OIII]4363	4818	1.44 ± 0.04	-8.9 ± 0.3	—
Hβ	5370	1.69 ± 0.04	-7.26 ± 0.15	—
[OIII]4959	5478	5.53 ± 0.06	-23.5 ± 0.2	—
[OIII]5007	5531	15.62 ± 0.12	-66.1 ± 0.5	—
[OI]6300	6961	1.07 ± 0.04	-4.00 ± 0.14	—
[NII]6548	7235	3.74 ± 0.07	-13.7 ± 0.3	—
Hα	7250	8.29 ± 0.09	-30.2 ± 0.3	—
[NII]6583	7273	7.80 ± 0.09	-28.4 ± 0.3	—
?	7310	23.6 ± 0.3	-85.5 ± 0.9	68.8 ± 0.7
[SII]6716	7420	1.78 ± 0.05	-6.41 ± 0.16	—
[SII]6731	7437	1.56 ± 0.05	-5.61 ± 0.16	—
SRGA J001059.5+424341				
[OII]3726	4274	1.9 ± 0.2	-9.3 ± 1.1	—
Hγ	4976	0.65 ± 0.11	-3.8 ± 0.6	—
[OIII]4363	5001	0.80 ± 0.11	-4.7 ± 0.6	—
Hβ, широкая	5572	10.7 ± 0.5	-58 ± 3	68 ± 3
Hβ	5572	0.94 ± 0.16	-5.1 ± 1.0	—
[OIII]4959	5685	2.92 ± 0.11	-16.0 ± 0.6	—
[OIII]5007	5740	9.44 ± 0.15	-53.0 ± 0.8	—
[OI]6300	7226	0.36 ± 0.07	-2.7 ± 0.5	—
[NII]6548	7509	0.11 ± 0.03	-0.8 ± 0.2	—
Hα, широкая	7523	49.0 ± 0.6	-369 ± 4	61.7 ± 0.9
Hα	7523	2.66 ± 0.15	-20.0 ± 1.1	—
[NII]6583	7544	0.34 ± 0.03	-2.5 ± 0.7	—
[SII]6716	7700	0.47 ± 0.07	-3.6 ± 0.5	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[SII]6731	7716	0.55 ± 0.11	-4.2 ± 0.8	—
SRGA J023800.1+193818				
$H\beta$, широкая	5029	6.2 ± 0.8	-17 ± 2	44 ± 5
$H\beta$	5029	< 0.3	> -0.7	—
[OIII]4959	5125	0.90 ± 0.14	-2.4 ± 0.4	—
[OIII]5007	5175	2.56 ± 0.17	-6.8 ± 0.5	—
[NII]6548	6768	0.29 ± 0.06	-0.64 ± 0.10	—
$H\alpha$, широкая	6783	21.2 ± 0.6	-48.8 ± 1.4	32.8 ± 1.0
$H\alpha$	6783	0.84 ± 0.19	-1.9 ± 0.4	—
[NII]6583	6803	0.86 ± 0.06	-1.9 ± 0.3	—
[SII]6716	6942	< 0.2	> -1.2	—
[SII]6731	6956	0.38 ± 0.11	-0.9 ± 0.2	—
SRGA J025900.3+502958				
$H\gamma$, широкая	4753	19 ± 3	-26 ± 3	48 ± 3
$H\beta$, широкая	5322	35 ± 2	-42 ± 3	43 ± 3
$H\beta$	5322	< 1.5	> -3	—
[OIII]4959	5429	8.7 ± 0.6	-10.5 ± 0.7	—
[OIII]5007	5481	23.8 ± 0.7	-28.8 ± 0.8	—
[NII]6548	7165	2.1 ± 0.2	-2.7 ± 0.3	—
$H\alpha$, широкая	7180	153 ± 2	-197 ± 3	40.9 ± 0.6
$H\alpha$	7180	2.4 ± 0.7	-3.1 ± 1.1	—
[NII]6583	7210	6.2 ± 0.2	-8.1 ± 0.8	—
[SII]6716	7352	2.7 ± 0.3	-3.6 ± 0.3	—
[SII]6731	7370	2.7 ± 0.3	-3.6 ± 0.3	—
SRGA J040335.6+472440				
$H\beta$, широкая	5340	27 ± 2	-59 ± 5	33 ± 3
$H\beta$	5340	< 1.9	> -4	—
[OIII]4959	5437	3.9 ± 0.6	-8.7 ± 1.3	—
[OIII]5007	5489	10.4 ± 0.8	-23.3 ± 1.7	—
[NII]6548	7183	2.2 ± 0.4	-6.7 ± 1.4	—
$H\alpha$, широкая	7198	60 ± 3	-185 ± 10	32.7 ± 1.4
$H\alpha$	7198	9.5 ± 1.5	-30 ± 6	—
[NII]6583	7219	6.6 ± 0.4	-20 ± 4	—
SRGA J165143.2+532539				
$H\beta$	5001	29.8 ± 1.6	-6.6 ± 0.3	—
[OIII]4959	5100	34.2 ± 1.5	-7.7 ± 0.3	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[OIII]5007	5149	96.7 ± 1.9	-21.8 ± 0.4	—
[OI]6300	6482	8.0 ± 1.0	-1.9 ± 0.2	—
[NII]6548	6736	23.4 ± 0.7	-5.82 ± 0.19	—
<i>Hα</i> , широкая	6751	97 ± 5	-24.6 ± 1.3	30.6 ± 1.7
<i>Hα</i>	6751	141 ± 3	-35.4 ± 1.0	—
[NII]6583	6772	70.1 ± 0.7	-17.6 ± 0.6	—
[SII]6716	6909	21.0 ± 1.0	-5.5 ± 0.2	—
[SII]6731	6924	20.5 ± 1.1	-5.4 ± 0.3	—
SRGA J181749.5+234311				
<i>Hβ</i>	5257	< 2	> -4	—
[OIII]4959	5358	3.7 ± 1.1	-4.9 ± 1.3	—
[OIII]5007	5414	11.2 ± 1.3	-13.8 ± 1.5	—
[OI]6300	6813	7.2 ± 0.9	-8.1 ± 1.0	—
[NII]6548	7082	4.0 ± 0.4	-4.4 ± 0.5	—
<i>Hα</i> , широкая	7097	43 ± 5	-47 ± 5	54 ± 7
<i>Hα</i>	7097	13.6 ± 1.4	-14.8 ± 1.5	—
[NII]6583	7118	11.9 ± 0.4	-13.0 ± 1.5	—
SRGA J191628.1+711619				
[OII]3726	4096	24 ± 4	-10.8 ± 1.8	—
<i>Hγ</i> , широкая	4778	30 ± 4	-18.1 ± 1.8	47 ± 3
<i>Hβ</i> , широкая	5339	58 ± 4	-31.0 ± 1.9	42 ± 2
<i>Hβ</i>	5339	5.1 ± 1.1	-2.8 ± 0.5	—
[OIII]4959	5447	28.7 ± 0.9	-16.0 ± 0.5	—
[OIII]5007	5500	90.1 ± 1.3	-52.0 ± 0.7	—
[OI]6300	6923	2.7 ± 0.6	-1.9 ± 0.4	—
[NII]6548	7193	2.9 ± 0.4	-2.1 ± 0.2	—
<i>Hα</i> , широкая	7208	230 ± 4	-170 ± 3	42.5 ± 0.8
<i>Hα</i>	7208	11.8 ± 1.4	-8.6 ± 0.8	—
[NII]6583	7228	8.7 ± 0.4	-6.4 ± 0.7	—
SRGA J194412.5-243619				
[OII]3726	4251	—	-24.9 ± 0.7	—
<i>Hγ</i>	4950	—	-5.1 ± 0.5	—
[OIII]4363	4974	—	-5.1 ± 0.4	—
<i>Hβ</i>	5544	—	-9.9 ± 0.5	—
[OIII]4959	5654	—	-29.9 ± 0.7	—
[OIII]5007	5709	—	-85.7 ± 0.9	—
[OI]6300	7184	—	-5.3 ± 0.7	—

Продолжение таблицы А.1

Линия	Длина волны Å	Поток $10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	EW Å	FWHM 10^2 км/с
[NII]6548	7468	—	-5.05 ± 0.16	—
$H\alpha$	7483	—	-30.7 ± 0.7	—
[NII]6583	7503	—	-15.1 ± 0.5	—
SRGA J195226.6+380011				
$H\gamma$, широкая	4683	6.2 ± 0.6	-23 ± 2	34 ± 2
$H\beta$, широкая	5234	8.6 ± 0.6	-22.2 ± 1.5	31 ± 2
$H\beta$	5234	1.3 ± 0.3	-3.4 ± 0.7	—
[OIII]4959	5339	4.0 ± 0.2	-10.0 ± 0.5	—
[OIII]5007	5390	11.5 ± 0.3	-28.4 ± 0.6	—
[NII]6548	7052	0.81 ± 0.15	-1.8 ± 0.4	—
$H\alpha$, широкая	7066	59.1 ± 1.3	-134 ± 4	28.2 ± 0.5
$H\alpha$	7066	7.8 ± 0.8	-18 ± 3	—
[NII]6583	7087	2.43 ± 0.15	-5.5 ± 1.2	—
SRGA J201633.2+705525				
[OII]3726	4688	1.5 ± 0.4	-4.3 ± 1.0	—
$H\gamma$, широкая	5479	7.0 ± 0.7	-28 ± 3	55 ± 4
$H\beta$, широкая	6115	10.9 ± 0.7	-48 ± 4	49 ± 3
$H\beta$	6115	1.36 ± 0.18	-6.1 ± 0.9	—
[OIII]4959	6238	1.92 ± 0.18	-8.4 ± 0.8	—
[OIII]5007	6298	6.8 ± 0.3	-29.1 ± 1.1	—