

РЕНТГЕНОВСКИЕ СВОЙСТВА МОЩНОГО КВАЗАРА PG 1634+706 НА $z = 1.337$ ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИЙ СРГ И ХММ ИМ. НЬЮТОНА

© 2023 г. Г. С. Усков^{1*}, С. Ю. Сазонов¹,
М. Р. Гильфанов^{1,2}, И. Ю. Лапшов¹, Р. А. Сюняев^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 21.11.2023 г.

После доработки 21.11.2023 г.; принята к публикации 21.11.2023 г.

Осенью 2019 г. во время фазы летных калибровок обсерватории СРГ телескопы eROSITA и ART-XC им. М.Н. Павлинского на ее борту провели серию наблюдений PG 1634+706 — одного из самых мощных (рентгеновская светимость $\sim 10^{46}$ эрг/с) квазаров во Вселенной на $z < 2$. Приблизительно в те же даты этот квазар наблюдался еще и обсерваторией ХММ-Newton. Хотя объект уже неоднократно исследовался в рентгене ранее, новые наблюдения позволили более точно измерить его энергетический спектр в широком диапазоне 1–30 кэВ (в системе покоя квазара). Полученный спектр можно описать двухкомпонентной моделью, состоящей из степенного континуума с наклоном $\Gamma \approx 1.9$, и уширенной эмиссионной линии железа на энергии около 6.4 кэВ. Была исследована также переменность рентгеновского излучения квазара. На временах порядка нескольких часов (здесь и далее — в системе покоя источника) рентгеновская светимость не демонстрирует статистически значимой переменности. Однако она заметно менялась от наблюдения к наблюдению осенью 2019 г., увеличившись примерно в полтора раза за 25 дней. Сравнение 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 варьировалась не более чем в 2.5 раза, а вариации на масштабах времени нескольких недель и нескольких лет сравнимы по амплитуде.

Ключевые слова: активные ядра галактик, сверхмассивные черные дыры, рентгеновские наблюдения.

DOI: 10.31857/S0320010823110098, EDN: RYAUQD

ВВЕДЕНИЕ

Активные ядра галактик (АЯГ) проявляют себя в широком диапазоне длин волн от радио- до гамма-лучей. Значительная доля ($\sim 10\%$, см., например, Элвис и др., 1994; Сазонов и др., 2004, 2012; Васудеван и др., 2007; Шенг и др., 2011) болометрической светимости АЯГ приходится на рентгеновское излучение. Считается, что оно возникает в горячей короне аккреционного диска в результате комптонизации теплового (в основном ультрафиолетового) излучения диска. Кроме того, в рентгеновских спектрах АЯГ наблюдаются особенности, связанные с отражением жесткого излучения короны от диска и окружающего газопылевого тора (см., например, недавний обзор Малиция и др., 2020). Таким образом, рентгеновские лучи из

АЯГ несут важную информацию об аккреции вещества на сверхмассивные черные дыры (СМЧД).

По данным космических обсерваторий детально изучены (см., например, де Роса и др., 2012; Ричи и др., 2017) рентгеновские спектры многих сейфертовских галактик, т.е. АЯГ сравнительно низкой светимости ($L_X \lesssim 10^{44}$ эрг/с в диапазоне 2–10 кэВ), расположенных в близкой Вселенной ($z \lesssim 0.1$). Как правило, такие объекты характеризуются сравнительно небольшими массами черных дыр ($M_{\text{ВН}} \lesssim 10^9 M_{\odot}$) и темпами аккреции (меньше 10% от критического, при котором достигается эддингтоновская светимость, см., например, Хорунжев и др., 2012; Прохоренко и др., 2021; Ананна и др., 2022). Так как свойства аккреционных дисков и их корон могут сильно зависеть как от массы черной дыры, так и от темпа аккреции (Шакура, Сюняев, 1973), то важно исследовать рентгенов-

*Электронный адрес: uskov@cosmos.ru

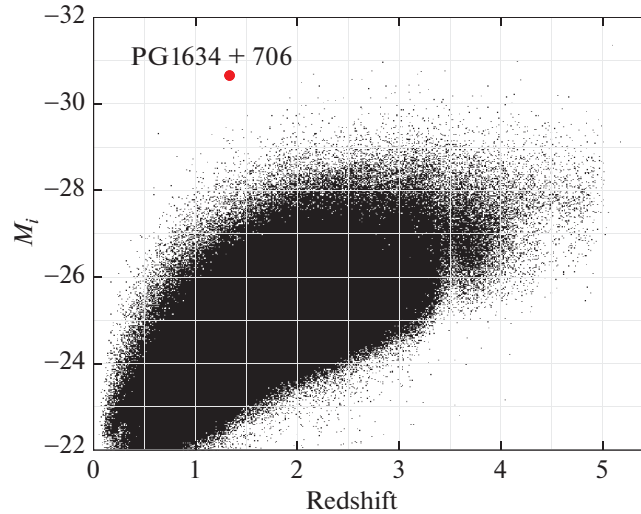


Рис. 1. Положение квазара PG 1634+706 (красная точка) на диаграмме красное смещение — абсолютная звездная величина в фильтре $i[z = 2]$. Черными точками показаны объекты из 16-го выпуска каталога квазаров SDSS (DR16v4, Лайк и др. 2020). Абсолютная величина квазара PG 1634+706, $M_i = -30.65$, была оценена по формуле (4) из статьи Ричардс и др., (2006) на основе измерения светимости на длине волны 2500 \AA , приведенного в табл. 2 статьи Шеммер и др. (2014). Необходимо отметить, что квазар PG 1634+706 не входит в каталог DR16v4, так как эта область неба не была покрыта в ходе спектроскопического обзора SDSS.

ское излучение не только сейфертовских галактик, но и АЯГ с более массивными черными дырами и/или более высокими эддингтоновскими отношениями. В частности, значительный интерес представляют сейфертовские галактики первого типа с узкими линиями (narrow-line Seyfert 1 galaxies), которые характеризуются более высокими (близкими к критическому) темпами аккреции по сравнению с обычными сейфертовскими галактиками при сравнительно низких массах черных дыр. Такие объекты хорошо изучены, и одной из их отличительных особенностей является сравнительная мягкость рентгеновских спектров (см., например, Джин и др., 2012).

Особый интерес представляют квазары большой светимости ($L_X \gtrsim 10^{46}$ эрг/с), в которых, вероятно, реализуется близкий к эддингтоновскому пределу режим аккреции на черную дыру с массой $M_{\text{ВН}} \gtrsim 10^9 M_{\odot}$. Такие объекты очень редки во Вселенной, и даже ближайшие из них находятся на огромных расстояниях от нас, что сильно затрудняет их рентгеновскую спектроскопию. В этой связи одним из наиболее интересных квазаров является PG 1634+706, который характеризуется огромной рентгеновской ($L_X \sim 10^{46}$ эрг/с) и болометрической ($\sim 10^{48}$ эрг/с) светимостью (см., например, Шеммер и др., 2014¹), но при этом на-

ходится на умеренном красном смещении $z = 1.337$ (Неелеман и др., 2016, см. рис. 1). Масса черной дыры оценивается в $\sim 10^{10} M_{\odot}$ (грубая оценка на основе ширины и светимости линии $\text{H}\beta$), а темп аккреции как близкий к критическому (Келли и др., 2008). Квазар был открыт по ультрафиолетовому избытку излучения в ходе знаменитого обзора Palomar–Green (Грин и др., 1986), и уже в начале 1980-х годов были проведены его первые исследования в рентгеновском диапазоне с помощью орбитальной обсерватории Einstein (Тананбаум и др., 1986). С тех пор он неоднократно становился мишенью рентгеновских наблюдений, что позволило исследовать его спектральные характеристики и переменность.

13 июля 2019 г. с космодрома Байконур была запущена российская рентгеновская обсерватория Спектр-РГ (далее СРГ, Сюняев и др., 2021). Во время перелета космического аппарата в район точки L2 системы Солнце–Земля в июле–декабре 2019 г. расположенные на его борту телескопы eРОЗИТА (Предел и др., 2021) и ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021) проводили наблюдения ряда астрофизических объектов для проверки работоспособности приборов и их калибровки. В числе мишеней был и квазар PG 1634+706, который наблюдался несколько раз осенью 2019 г. Примерно в те же даты были проведены еще и его наблюдения обсерваторией XMM-Newton (Янсен и др., 2001). Полученные с трех телескопов данные позволили нам исследовать рентгеновский спектр PG 1634+706 и изучить его

¹ В цитируемой работе приведена оценка светимости на длине волны 2500 \AA , $\nu L_{\nu, 2500} \sim 3 \times 10^{47}$ эрг/с, а соответствующая болометрическая поправка для квазаров оценивается на уровне ~ 3 (Кравчук и др., 2013).

Таблица 1. Журнал наблюдений PG 1634+706 за 2019 г.

Период наблюдений	Обсерватория	Телескопы, приборы	Экспозиция, кс
2019-09-29 21:38–09-30 13:05	СРГ	ART-ХС, eРОЗИТА (ТМ6)	48.3, 55.0
2019-10-20 14:42–10-21 01:52	СРГ	ART-ХС, eРОЗИТА (ТМ1-7)	37.7, 39.0
2019-10-25 18:02–10-26 00:58	ХММ-Newton	EPIC-PN	14.4
2019-11-23 09:11–20:18	СРГ	ART-ХС, eРОЗИТА (ТМ1-7)	37.0, 38.3
2019-11-24 14:38–19:54	ХММ-Newton	EPIC-PN	12.7
2019-11-26 07:05–18:14	СРГ	eРОЗИТА (ТМ1-7)	39.8
2019-11-26 14:32–22:19	ХММ-Newton	EPIC-PN	17.3

Примечание. В первом столбце — всемирные времена начала и окончания наблюдения. Во втором и третьем столбцах — название обсерватории и соответствующих телескопов и приборов, при этом для телескопа eРОЗИТА в скобках указаны включенные камеры. В последнем столбце — эффективное время экспозиции, поправленное за виньетирование.

переменность с высокой надежностью и точностью. Результаты этого исследования представлены в настоящей статье.

В работе используется космологическая модель Λ CDM с параметрами $H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_\Lambda = 0.7$.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В табл. 1 представлена информация о рентгеновских наблюдениях квазара PG 1634+706 осенью 2019 г., данные которых использовались в настоящей работе. Это 4 наблюдения обсерватории СРГ, в которых PG 1634+706 находился не далее $13'$ от оси телескопа eРОЗИТА, и три наблюдения обсерватории ХММ-Newton. Последние были примерно синхронизированы с наблюдениями СРГ: разница в эпохах наблюдений составляет около 5 дней для октябрьского наблюдения и менее одного дня — для двух ноябрьских. Во время наблюдения СРГ 29 сентября был включен только шестой (ТМ6) из семи модулей телескопа eРОЗИТА, а в трех более поздних наблюдениях работали уже все семь камер телескопа (ТМ1–ТМ7).

Так как рассматриваемые наблюдения СРГ проводились на стадии калибровочных и проверочных наблюдений обсерватории (Calibration and Performance Verification, Cal-PV), то их мишень — квазар PG 1634+706 — находилась в разных наблюдениях на разных угловых расстояниях от оптической оси телескопов eРОЗИТА и ART-ХС (примерно соосных). А именно, в первом наблюдении источник находился практически в центре поля зрения, во втором и третьем — в 2–3 угл. мин от оси, а в последнем — примерно в 13 угл. мин от центра. Учитывая значительное падение эффективной площади телескопа ART-ХС на больших угловых расстояниях от оси, мы

использовали данные самого позднего наблюдения (26 ноября) телескопа eРОЗИТА только для исследования переменности рентгеновского потока и не использовали данные телескопов eРОЗИТА и ART-ХС этого наблюдения для спектрального анализа.

Для всех трех наблюдений обсерватории ХММ-Newton в настоящей работе использовались только данные камеры EPIC-PN (далее EPN), наиболее чувствительного прибора обсерватории. Данные с камер EPIC-MOS не использовались, так как наблюдения PG 1634+706 осенью 2019 г. проводились в режиме маленького окна (Small Window), с угловым размером $258'' \times 258''$ для EPN и $110'' \times 110''$ для EPIC-MOS, что делает практически невозможным надежное определение фона (для спектрального анализа) в последнем случае.

СРГ/eРОЗИТА

Калибровка и обработка данных телескопа eРОЗИТА производились с помощью набора программ eROSITA Science Analysis Software System (eSASS) версии `esass_211201` и программного обеспечения (ПО), разработанного авторами. Использовалась калибровочная база данных версии `caldb_211201`.

Списки событий были отфильтрованы с использованием интервалов полезного времени QUALGTI с помощью программы *evtool* (v2.29.2/2.18)². При этом были исключены интервалы времени, в течение которых происходила переориентация обсерватории СРГ. Чистое время экспозиции, поправленное за виньетирование, для каждого наблюдения приведено в табл. 1.

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

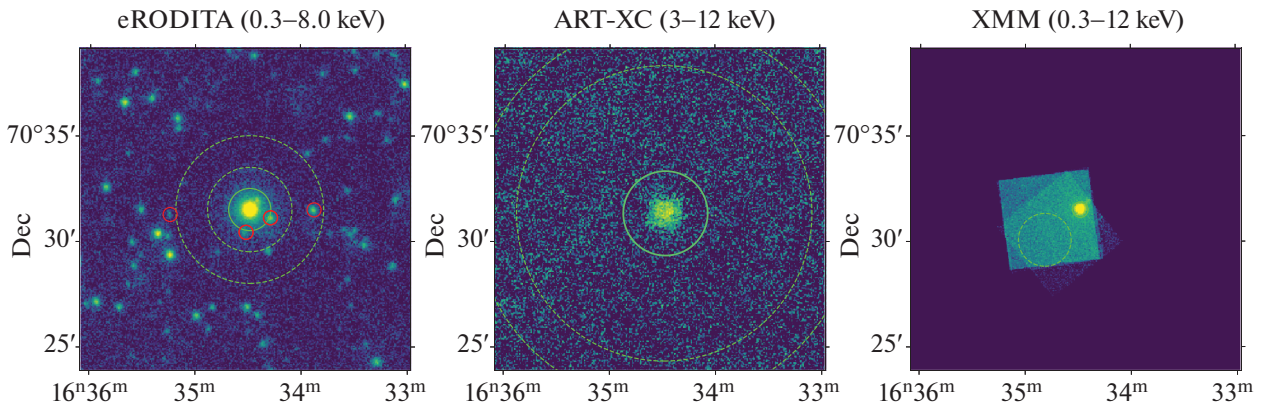


Рис. 2. Рентгеновские изображения квазара PG 1634+706, полученные по данным серий наблюдений (см. табл. 1) телескопов ePOZITA, ART-XC обсерватории СРГ и телескопа EPN обсерватории XMM-Newton (в диапазонах энергий 0.3–8, 3–12 и 0.3–12 кэВ соответственно). На каждой панели зеленой сплошной окружностью отмечена область извлечения спектра источника, а пунктирными окружностями — область извлечения фона (для XMM-Newton эти области несколько отличаются в разных наблюдениях, показаны области для наблюдения 25 октября 2019 г., OBSID=0852980501). Красные кружки на изображении ePOZITA обозначают области вокруг других зарегистрированных источников, события в которых были исключены из спектрального и временного анализов.

Для извлечения рентгеновских спектров и кривых блеска использовалась процедура *srctool*. Фотоны от источника извлекались в области с радиусом $1'$ (рис. 2). Фон оценивался в кольце вокруг источника с внутренним и внешним радиусами $2'$ и $3.5'$ соответственно. Из рассмотрения были исключены события в радиусе $20''$ от ближайших к квазару других источников, зарегистрированных телескопом ePOZITA (рис. 2).

Полученные спектры источника были сбинированы таким образом, чтобы в каждом интервале энергий было как минимум 30 отсчетов (как для ART-XC, см. ниже) от источника и фона. Кривые блеска были сбинированы по 1 кс, кроме наблюдения 2019-09-29, которое было сбинировано по 4 кс. При таком разбиении в каждом временном интервале оказывается не менее 15 суммарных отсчетов от источника и фона. В конце каждого наблюдения были убраны интервалы, связанные с “плохим” временем (по GTI). Для вычисления 68% доверительных интервалов на темп счета был использован метод Монте-Карло, при котором случайным образом разыгрываются отсчеты от источника и фона согласно распределению Пуассона.

СРГ/ART-XC

Извлечение спектров производилось с помощью стандартного набора программ ART-XC, адаптированного под цели данного исследования, используя актуальную версию калибровок. В отдельных энергетических интервалах были построены карты фотонов, экспозиций и виньетирования. Для учета вклада фона частиц в спектр источника были построены модельные карты фона частиц,

полученные во время обзора всего неба в периоды, когда в поле зрения не наблюдались источники. Спектр квазара PG 1634+706 извлекался в кружке с радиусом $2'$. Нормировка фона оценивалась в кольце с внутренним и внешним радиусами $7'$ и $9'$ соответственно (рис. 2). В кольцевом регионе модельная карта фона нормировалась на карту фона с учетом экспозиции. Нормированная карта фона использовалась в регионе с источником для вычитания подстилающего фона. Оставшиеся фотоны считались принадлежащими источнику и корректировались на карту виньетирования для приведения к номинальной эффективной площади.

Угловое разрешение ART-XC не позволяет надежно разделить излучение квазара PG 1634+706 и других точечных источников, которые регистрируются телескопом ePOZITA в пределах $2'$ от него (рис. 2). Однако вклад этих источников в поток от квазара в диапазоне энергий от 0.3 до 8 кэВ не превышает 5% по данным ePOZITA. Следовательно, неразрешенные источники не должны заметно влиять на спектр, измеренный телескопом ART-XC. Мы ограничились использованием энергетических каналов выше 5 кэВ при проведении спектрального анализа. Это связано с тем, что матрица отклика телескопа ART-XC недостаточно хорошо откалибрована вблизи нижней границы диапазона чувствительности его детекторов (~ 3 –4 кэВ). Оставшиеся энергетические каналы были сбинированы таким образом, чтобы в получившихся интервалах было как минимум по 30 отсчетов (это диктуется необходимостью использовать критерий χ^2 при моделировании спектров СРГ, так как в используемых нами спектральных данных ART-XC уже вычтен фон).

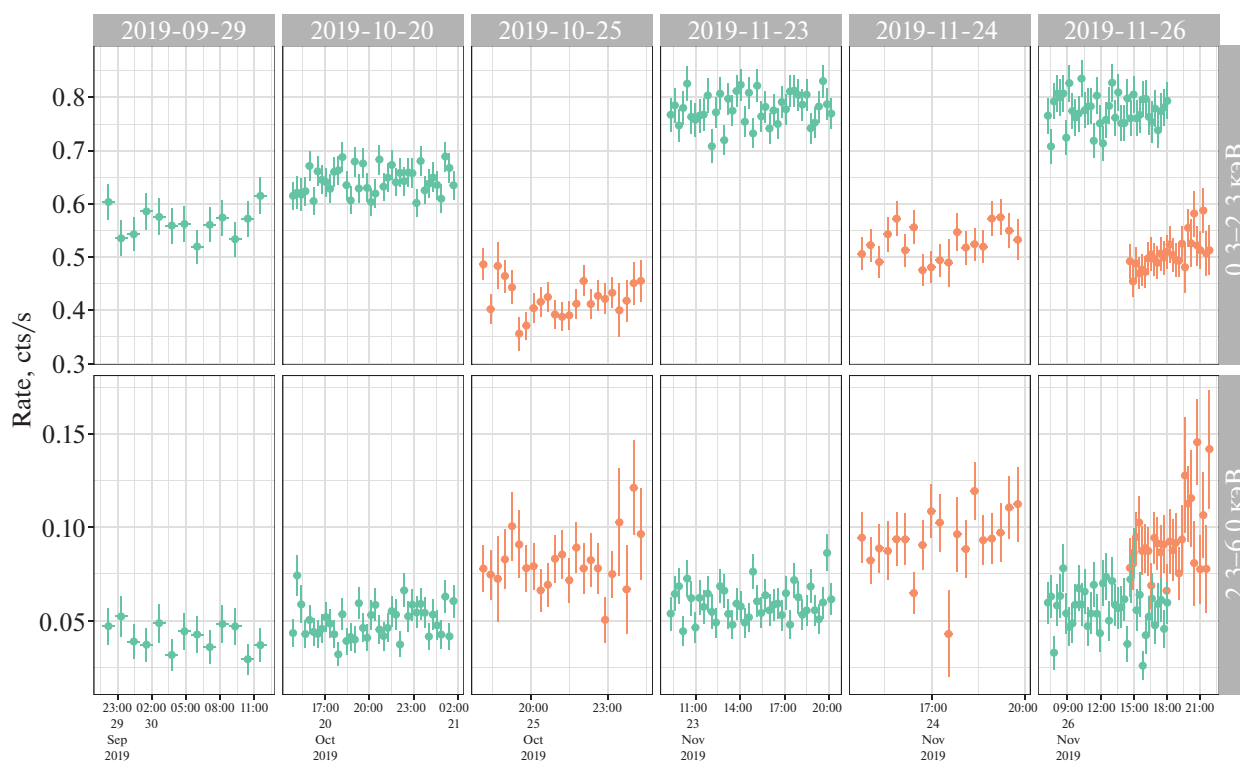


Рис. 3. Кривые блеска (в отсчетах в секунду) по данным SRG/eРОЗИТА (зеленым цветом) и XMM-Newton/EPN (оранжевым) для отдельных наблюдений, в двух диапазонах энергий: 0.3–2.3 кэВ (сверху) и 2.3–6.0 кэВ (снизу). Необходимо отметить, что абсолютные значения скоростей счета eРОЗИТА и EPN нельзя напрямую сравнивать друг с другом.

XMM-Newton/EPN

Первичная обработка данных с камеры EPN обсерватории XMM-Newton производилась с использованием ПО Science Analysis System (SAS) v20.0. Были использованы последние версии калибровки на момент выхода SAS v20.0.

Полученный файл событий был отфильтрован: оставлены только одиночные и двойные события ($PATTERN \leq 4$) в диапазоне энергий 0.3–12 кэВ, убраны времена с повышенным фоном³, а также события в плохих пикселях и рядом с ними ($FLAG=0$).

Спектральные и временные данные извлекались с помощью программы xmmselect. Области источника и фона выбирались так, чтобы максимизировать отношение сигнала к шуму. На правой панели рис. 2 показано суммарное изображение по трем наблюдениям 2019 г. обсерватории XMM-Newton.

Полученные спектры источника были сбинированы таким образом, чтобы в каждом интервале энергий было как минимум 5 отсчетов. Это необходимо для аппроксимации спектров с помощью W -статистики (далее в тексте именуется

Cstat), которая учитывает наличие рентгеновского фона с распределением Пуассона. Кривые блеска были сбинированы по 1 кс. Также были убраны временные бины с долей эффективного времени $FRACEXP < 0.1$. При таком разбиении в каждом временном интервале оказывается не менее 15 чистых отсчетов от источника.

БЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

Для исследования рентгеновской переменности квазара PG 1634+706 на масштабах времени короче суток были построены кривые блеска по данным телескопов SRG/eРОЗИТА и XMM-Newton/EPN для отдельных наблюдений. На рис. 3 показаны зависимости темпа счета от времени в двух энергетических диапазонах 0.3–2.3 и 2.3–6.0 кэВ.

Чтобы понять, есть ли статистически значимая переменность рентгеновского потока в данном наблюдении и в данном диапазоне энергий, была рассчитана статистика χ^2 :

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

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

где f_i — темп счета в i -м временном интервале, σ_i — соответствующая погрешность, \bar{f} — средневзвешенный темп счета за все наблюдение, N — количество измерений. Вероятность получить случайным образом значение распределения χ^2 больше измеренного при числе степеней свободы $\text{dof} = N - 1$ характеризует вероятность $(1 - p)$ того, что темп счета был постоянным в данном наблюдении. Для оценки амплитуды рентгеновской переменности была рассчитана дисперсия, нормированная на средний поток и поправленная за ошибки измерений потока (Воан др., 2003):

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

где

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_i - \langle f \rangle)^2, \quad (3)$$

$$\overline{\sigma_{\text{err}}^2} = \frac{1}{N} \sum_i \sigma_i^2 \quad (4)$$

и $\langle f \rangle$ — среднеарифметическое значение темпа счета.

Таблица 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				
eРОЗИТА	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				
eРОЗИТА	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

Погрешность σ_{rms}^2 можно оценить по формуле из Тёрнер и др. (1999):

$$\delta\sigma_{\text{rms}}^2 = \frac{s_D}{\langle f \rangle^2 \sqrt{N}}, \quad (5)$$

где

$$s_D^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{[(f_i - \langle f \rangle)^2 - \sigma_i^2] - \sigma_{\text{rms}}^2 \langle f \rangle^2\}^2. \quad (6)$$

Полученные значения величин χ^2 (dof), $1 - p$ и σ_{rms}^2 приведены в табл. 2. Статистически значимой переменности (на уровне значимости больше 2σ) ни в одном из наблюдений СРГ/eРОЗИТА и ХММ-Newton не обнаружено.

Также кривые блеска были изучены на наличие линейного тренда. Только для наблюдения ХММ-Newton 26 ноября 2019 г. в диапазоне энергий 0.3–2.3 кэВ было обнаружено статистически значимое ($p < 0.0001$) улучшение качества аппроксимации кривой блеска, а именно есть указание на рост скорости счета в ходе наблюдения. При этом в наблюдении СРГ/eРОЗИТА, проведенном лишь несколькими часами ранее и частично пересекающимся по времени с наблюдением ХММ-Newton, подобного положительного тренда не обнаружено.

РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТР

Спектры аппроксимировались с помощью ПО *XSPEC* v12.12.0⁴ (Арно, 1996). Данные телескопов eРОЗИТА и ART-XC анализировались совместно, а данные ХММ-Newton/EPN — отдельно. Для подгонки моделей к данным телескопов обсерватории СРГ использовалась χ^2 -статистика, а для данных ХММ-Newton/EPN — Cstat.

Сначала мы попробовали описать спектр источника степенным законом с завалом на низких энергиях из-за фотопоглощения в Галактике. В терминологии XSPEC использовалась модель:

$$TBabs(zpowerlaw),$$

где TBabs — модель межзвездного поглощения Вилмс и др. (2000). Следуя примеру авторов предыдущих статей о рентгеновских наблюдениях квазара PG 1634+706 (в частности, Пиконсэли и др., 2005), мы зафиксировали лучевую концентрацию водорода в направлении на этот объект на галактическом значении $N_{\text{H}} = 5.74 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (Элвис и др., 1989).

Результат аппроксимации измеренных спектров этой эмпирической моделью показан на рис. 4 и

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

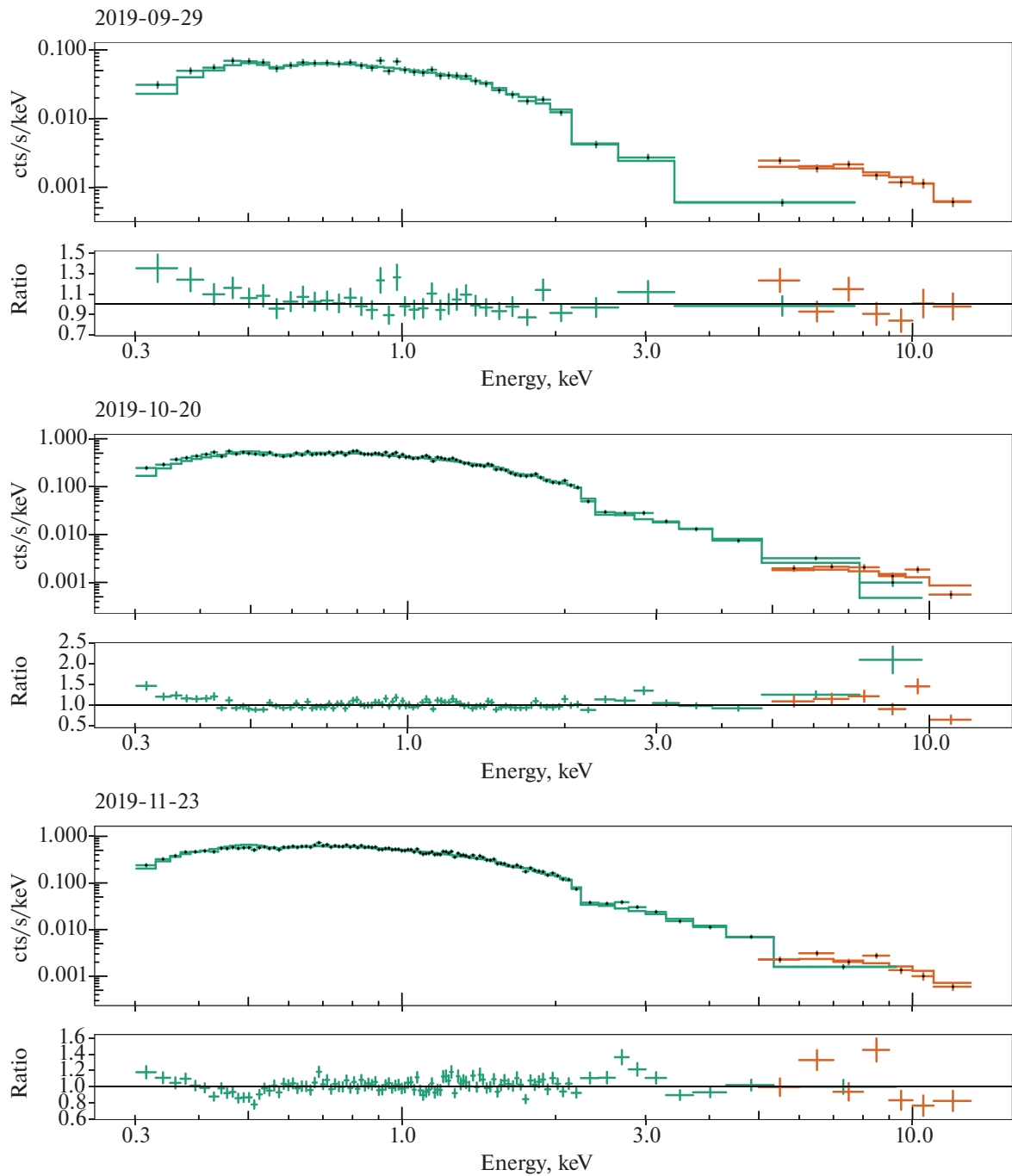


Рис. 4. Рентгеновский спектр квазара PG 1634+706, измеренный телескопами eРОЗИТА (зеленый цвет) и ART-XC (оранжевый цвет) обсерватории СРГ в разные даты. Все три спектра аппроксимировались совместно степенным законом с поглощением в Галактике, с единым наклоном, но разными нормировками (см. табл. 3). Для лучшей наглядности спектры на рисунке были перебинированы. Под каждым спектром показано отношение данных к модели.

рис. 5. При моделировании предполагалось, что наклон спектра оставался постоянным во всех наблюдениях СРГ, но его нормировка (т.е. рентгеновский поток) могла меняться. Так как в реальности наклон мог немного меняться от наблюдения к наблюдению и учитывая, что разные наблюдения проводились под разными углами к оптической

оси телескопов, мы добавили в модель кросс-калибровочный коэффициент между телескопами eРОЗИТА и ART-XC в качестве свободного параметра. Такое же предположение (о постоянстве спектрального наклона) было сделано и в отношении наблюдений XMM-Newton. Таким образом, совместно аппроксимировались, во-первых, три

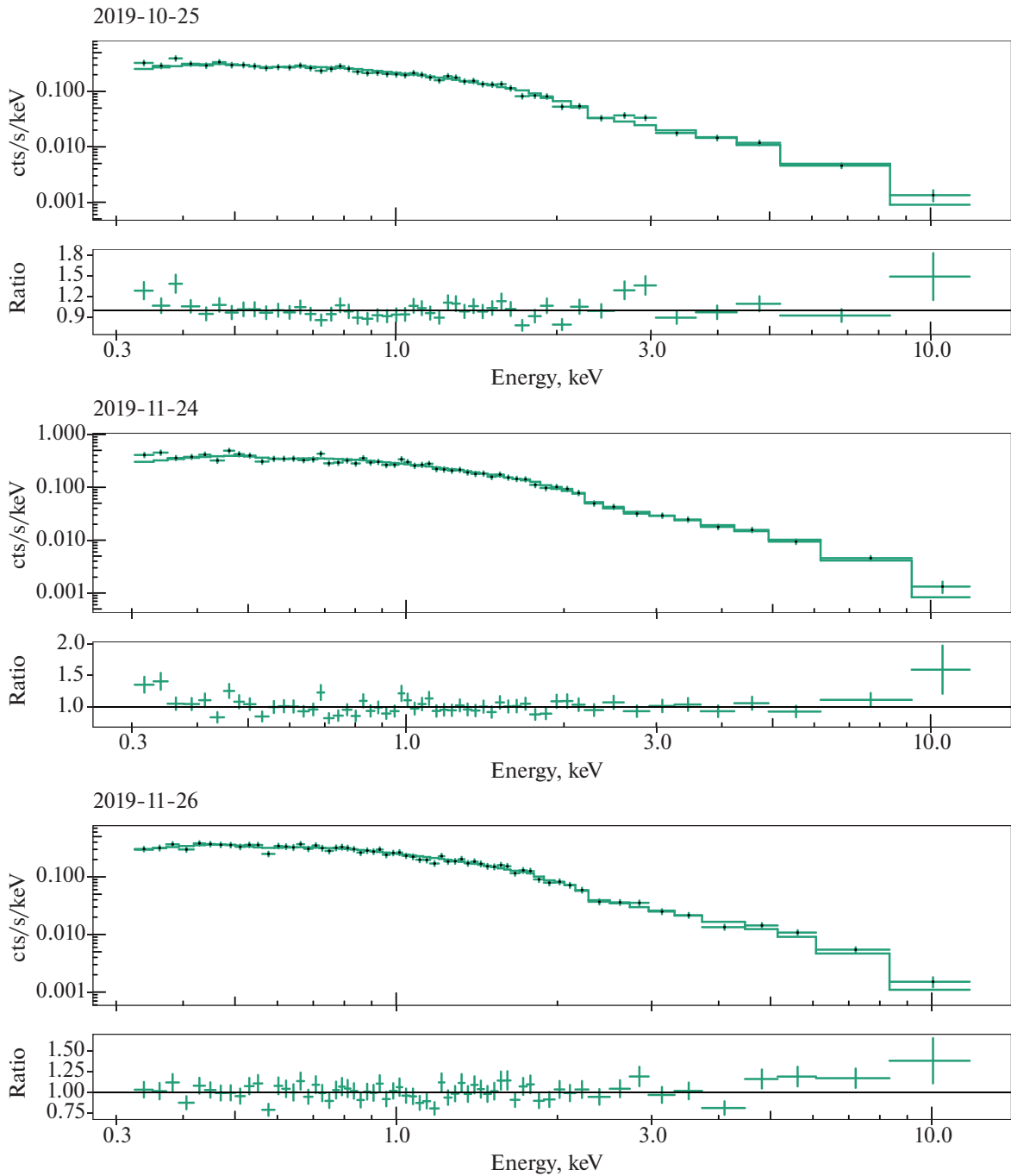


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для данных XMM-Newton.

спектра СРГ и, во-вторых, три спектра XMM-Newton. Полученные значения параметров модели приведены в табл. 3. Доверительные интервалы значений параметров здесь и далее указаны на уровне 68%, а верхние пределы — на уровне 2σ , если не указано иного.

Хотя степенной закон с поглощением в целом удовлетворительно описывает форму измеренных спектров, наблюдается ряд статистически значимых дополнительных особенностей, а имен-

но: 1) избыток мягкого рентгеновского излучения на энергиях ~ 0.3 – 0.4 кэВ, 2) избыток излучения в районе энергии 2.7 кэВ, 3) понижение интенсивности в районе энергии 0.5 кэВ. Первые две особенности проявляются как в спектрах СРГ, так и в спектрах XMM-Newton (менее явно), а последняя — в спектре СРГ, полученном 23 ноября 2019 г., и на низком уровне значимости в спектре СРГ от 20 октября 2019 г.

Таблица 3. Результаты аппроксимации спектров, измеренных обсерваториями СРГ и ХММ-Newton, степенным законом с поглощением

СРГ/еРОЗИТА, ART-XC			
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
Г		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)	
ХММ-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
Г		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)	

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

Избыток излучения на энергиях ниже ~ 1 кэВ (в системе покоя источника), наблюдаемый в спектре PG 1634+706, не является уникальным для этого объекта. Такая дополнительная компонента излучения регистрируется в спектрах (хорошего качества) большинства АЯГ 1-го типа, а ее природа активно обсуждается (см., например, Тернер, Паундс, 1989; Гуаницци и др., 2007; Босэй и др., 2016). В частности, она может возникать в результате комптонизации ультрафиолетового излучения аккреционного диска в “теплой короне” (с температурой порядка нескольких 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.

Энергия 2.7 кэВ, на которой тоже наблюдается избыток излучения в спектре квазара PG 1634+706, примерно соответствует положению линии $K\alpha$ нейтрального или слабоионизованного железа (6.4 кэВ) на красном смещении объекта: $6.4/(1+z) = 2.74$ кэВ. Это свидетельствует о том, что мы имеем дело с эмиссионной линией

железа или комплексом таких линий. Что касается “абсорбционной” особенности в районе энергии 0.5 кэВ в спектрах телескопа еРОЗИТА, то она, наряду с избытком излучения на низких энергиях, может быть проявлением более сложной формы спектра, чем простые модели континуума, которые мы попробовали применить.

Недостаточно высокая статистическая значимость детектирования мягкой компоненты излучения в спектре квазара PG 1634+706 не позволяет исследовать ее более подробно. Поэтому мы исключили из дальнейшего рассмотрения область энергий ниже 0.7 кэВ, сосредоточившись на исследовании формы спектрального континуума в диапазоне энергий от 0.7 до ~ 13 кэВ и эмиссионной особенности в районе линии Fe $K\alpha$.

Последующий анализ проводился по отдельности для каждого полученного спектра СРГ и ХММ-Newton, т.е. предполагалось, что не только нормировка, но и форма спектра могли меняться от наблюдения к наблюдению. Кросс-калибровочная константа между данными телескопов еРОЗИТА и ART-XC больше не использовалась.

Использовались три модели. Во-первых, мы опять применили степенную модель с поглощением в Галактике ($TBabs(zpowerlaw)$ в терминологии *XSPEC*), которая далее называется моделью *PL*. Затем, для описания эмиссионной особенности в районе 6.4 кэВ (в системе покоя квазара) мы добавили к этой модели линию с гауссовым профилем: $TBabs(zpowerlaw + zgauss)$ (далее *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 компонента, связанная с отражением степенного континуума от холодного диска (Мадзиарз, Здзярски, 1995), 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_{refl} , который для этой цели был задан отрицательным (см. описание *PEXRAV* в *XSPEC*); далее будем использовать обозначение $R_{refl} \equiv -rel_{refl}$. Спектральный наклон падающего излучения в компоненте *PEXRAV* был привязан к наклону компоненты *PL*. Обилие тяжелых элементов было зафиксировано на солнечном, согласно Андерс и Гривес (1989). Косинус угла наклона был зафиксирован на значении 0.5. Завал на высоких энергиях не рассматривался. Из-за низкой значимости детектирования эмиссионной линии железа в спектрах ХММ-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 СРГ моделью *PL + GAUSS + PEXRAV*.

На рис. 6 и рис. 7 показано, как спектры СРГ и ХММ-Newton аппроксимируются трехкомпонентной моделью *PL + GAUSS + PEXRAV*. В табл. 4 и 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 СРГ, 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 eРОЗИТА), а также спектра ХММ-Newton, измеренного 25 октября 2019 г. При этом ширина линии по данным СРГ/eРОЗИТА 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 ХММ-Newton (26 ноября 2019 г.), где есть слабое указание (на уровне ~ 2 стандартных отклонений) на ее присутствие.

На рис. 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.

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Как уже отмечалось во Введении, квазар PG 1634+706 неоднократно наблюдался разными рентгеновскими обсерваториями начиная с 1981 г. Это позволяет проследить эволюцию его активности в рентгеновских лучах в течение примерно 17 лет в системе покоя источника. В табл. 6 собрана краткая информация о всех рентгеновских наблюдениях PG 1634+706, а именно наблюдениях обсерваторий Einstein, ROSAT, ASCA, Chandra, ХММ-Newton, Swift и СРГ.

В работе Шеммер и др. (2014) для всех наблюдений до 2012 г. включительно были оценены рентгеновские потоки в наблюдаемом диапазоне 0.2–10 кэВ, поправленные за поглощение в Галактике. При этом предполагалось, что спектр квазара описывается степенным законом с показателем $\Gamma = 2$. Новыми по сравнению с работой Шеммер и др. (2014) являются только наблюдения обсерваторий СРГ и ХММ-Newton, проведенные осенью 2019 г. Мы использовали рентгеновские потоки из работы Шеммер и др. (2014) для оценки светимости квазара в диапазоне энергий 2–10 кэВ (в системе покоя источника) для всех архивных наблюдений. Используя ту же спектральную модель (степенной закон с $\Gamma = 2$ и поглощением в Галактике) и данные, обсуждаемые в настоящей статье, мы рассчитали светимости для наблюдений СРГ и ХММ-Newton в 2019 г. Полученные оценки

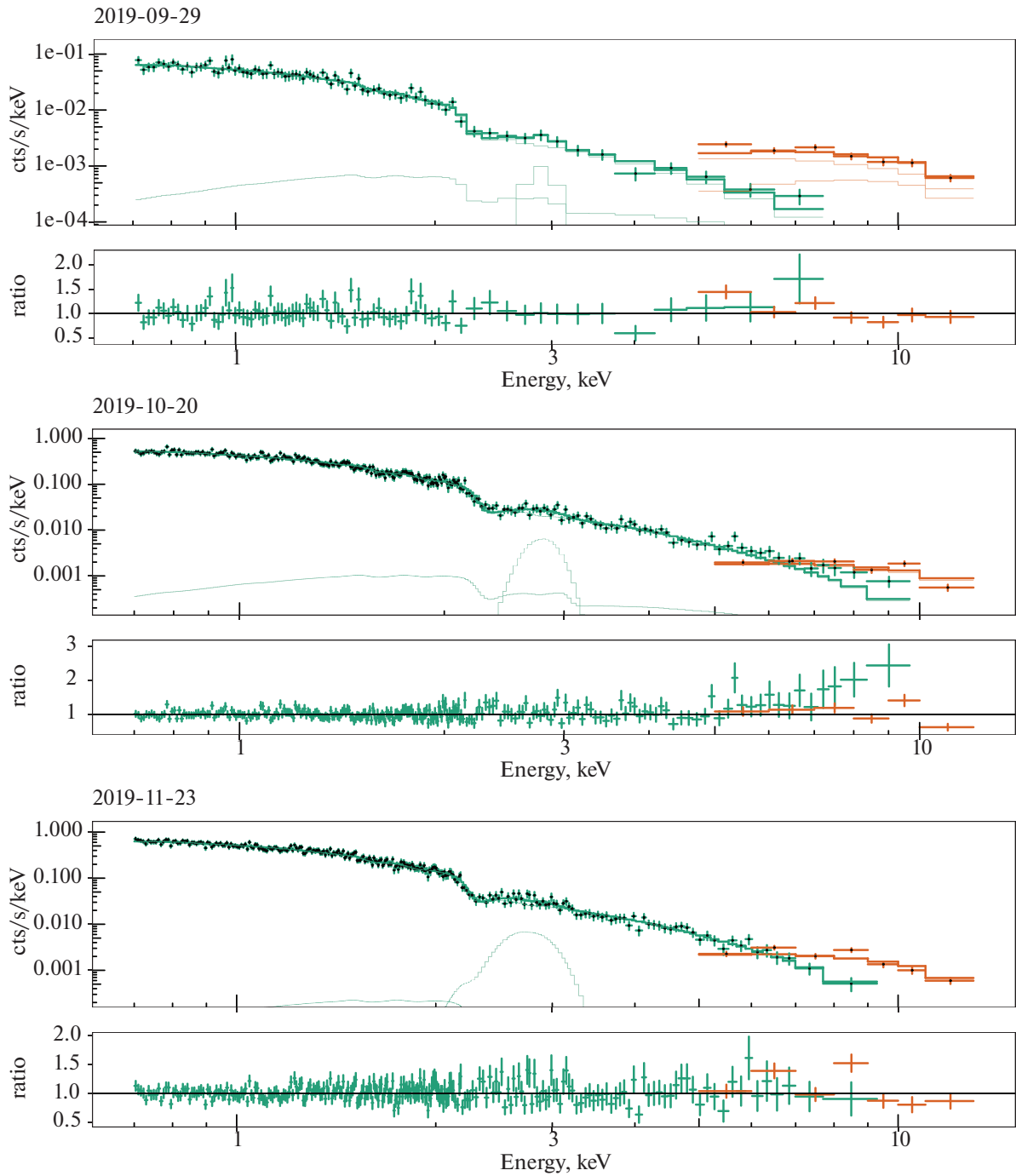


Рис. 6. Аппроксимация спектров квазара PG 1634+706, измеренных телескопами eРОЗИТА (зеленый цвет) и ART-XC (оранжевый цвет) обсерватории СРГ в разные даты, моделью $PL + GAUSS + PEXRAV$ с поглощением в Галактике (см. табл. 4). Сплошными линиями, кроме совокупной модели, показаны ее отдельные компоненты: степенной континуум PL , гауссова линия $GAUSS$ и отраженная компонента $PEXRAV$ (при наличии). Спектры перебинированы для наглядности. Под каждым спектром показано отношение данных к модели.

светимости и их статистические погрешности приведены в табл. 6. Отметим, что эти погрешности получились значительно меньше ($\lesssim 2\%$), чем соответствующие погрешности на поток степенной компоненты, полученные нами ранее при моделировании рентгеновских спектров СРГ и XMM-Newton (ср.

с результатами в табл. 4 и 5). Это связано с тем, что в том случае наклон спектра являлся свободным параметром, а также одновременно использовался еще ряд свободных параметров.

Необходимо отметить, что так как разные измерения были получены по данным разных приборов

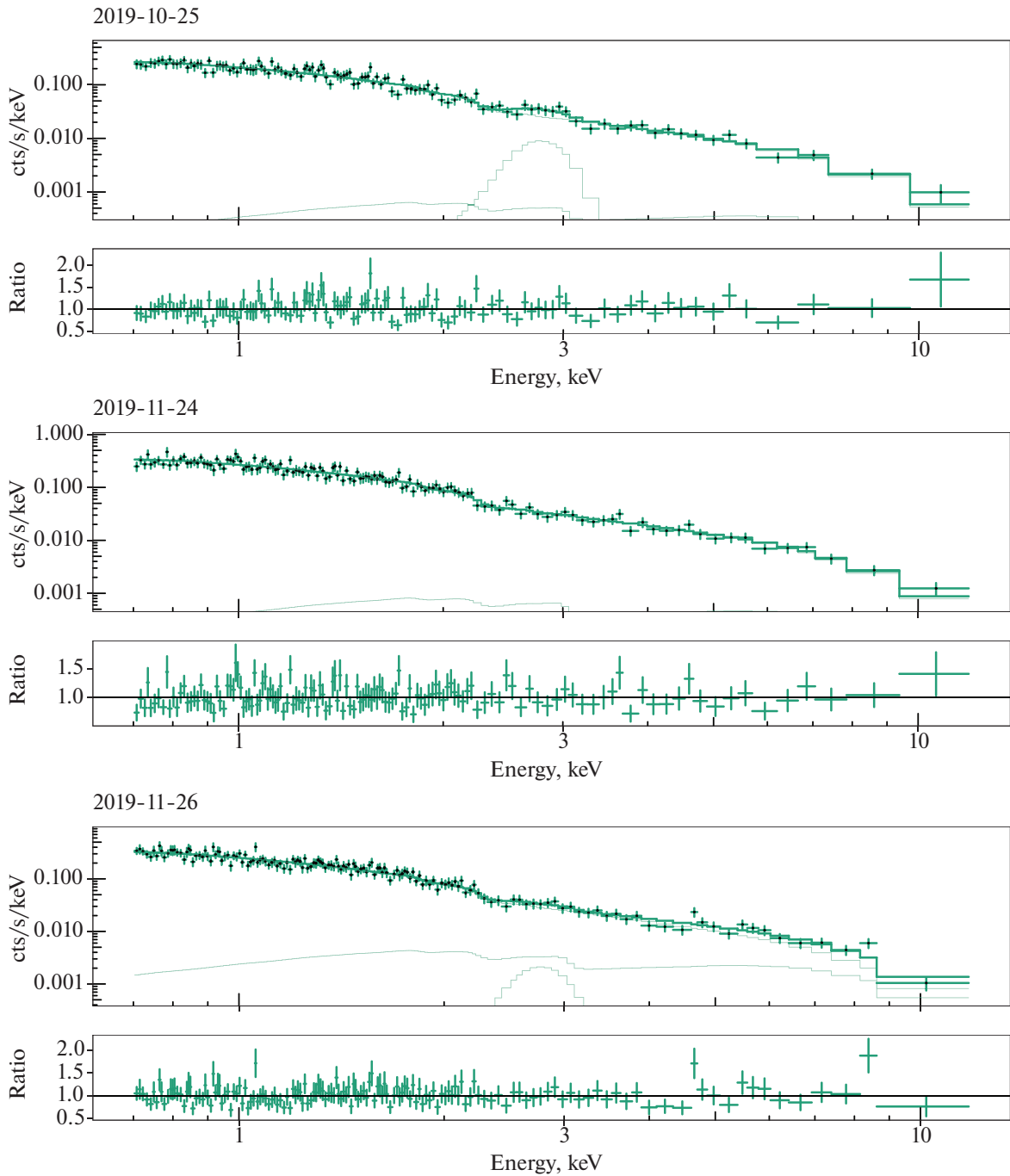


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для данных XMM-Newton.

и в исходно разных диапазонах энергий, то это должно приводить к дополнительной систематической погрешности при оценке светимости. По всей видимости, эта неопределенность не превышает 10–20% (Шеммер и др., 2014) для данных, полученных после 2000 г., принимая во внимание тщательную кросс-калибровку современных рентгеновских обсерваторий и то, что все эти данные были получены примерно в одинаковых диапазонах энергий. Однако систематическая погрешность

может быть более существенной для более ранних наблюдений, в частности обсерваторий Einstein и ROSAT, особенно принимая во внимание мягкий диапазон энергий (0.3–3.3 и 0.5–2.0 кэВ соответственно), в котором проводились эти измерения.

На рис. 9 показано, как эволюционировала светимость квазара PG 1634+706 в 1981–2019 гг. Хотя кривая блеска характеризуется большой скважностью, можно достаточно уверенно говорить о том, что рентгеновское излучение переменн

Таблица 4. Результаты аппроксимации спектров, измеренных обсерваторией СРГ, 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)

Примечание. 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.

на масштабах времени от нескольких дней до нескольких лет (в системе покоя источника). Отношение максимальной ($\sim 1.25 \times 10^{46}$ эрг/с в ноябре 2002 г.) к минимальной ($\sim 5 \times 10^{45}$ эрг/с в январе 2009 г.) рентгеновской светимости за всю историю наблюдений квазара составляет ~ 2.5 . При этом $\sigma_{rms}^2 = 0.030 \pm 0.016$ (по формуле (2), т.е. характерная амплитуда вариаций светимости составляла $\sim 16\%$. Осенью 2019 г., во время наблюдений обсерваторий СРГ и ХММ-Newton, объект находился в “среднем” для себя состоянии, когда его светимость варьировалась в диапазоне от 6×10^{45} до 9×10^{45} эрг/с и практически монотонно возрастала.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя квазар PG 1634+706 уже неоднократно исследовался в рентгене ранее, новые наблюдения с помощью обсерваторий СРГ и ХММ-Newton позволили нам более точно измерить его энергетический спектр в широком диапазоне ~ 1 –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

Таблица 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
$F_{\text{PL}} (4\text{--}12 \text{ кэВ}), 10^{-13} \text{ эрг/с/см}^2$	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
$F_{\text{PL}} (4\text{--}12 \text{ кэВ}), 10^{-13} \text{ эрг/с/см}^2$	$6.4^{+0.4}_{-0.3}$	8.4 ± 0.4	8.2 ± 0.4
$E_{\text{line}}, \text{ кэВ}$	6.5 (фикс.)	6.5 (фикс.)	6.5 (фикс.)
$\sigma_{\text{line}}, \text{ кэВ}$	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)
$EW, \text{ кэВ}$	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
$F_{\text{PL}} (4\text{--}12 \text{ кэВ}), 10^{-13} \text{ эрг/с/см}^2$	$6.1^{+0.6}_{-0.7}$	$8.0^{+0.7}_{-0.8}$	6.6 ± 0.7
$E_{\text{line}}, \text{ кэВ}$	6.50 (фикс.)	6.50 (фикс.)	6.50 (фикс.)
$\sigma_{\text{line}}, \text{ кэВ}$	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)	0.50 (фикс.)
$EW, \text{ кэВ}$	$0.20^{+0.05}_{-0.06}$	< 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)

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 SRG и XMM-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, Джордж, Фабиан 1991). При этом значительное уширение линии может быть связано с доплеровским уширением в аккреционном диске (для этого требуются лучевые скорости

$v_{\text{r}}/c \sim 0.06$), как это часто обсуждалось в контексте рентгеновских двойных систем и АЯГ (см., например, обзор Миллер и др. 2007), 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, Наякшин и др. 2000; Росс, Фабиан 2005).

Что касается основной (степенной) компоненты спектра, то измеренные в разных наблюдениях SRG и XMM-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 укрупнения рентгеновского континуума с увеличением светимости и/или эддингтоновского отношения, которая отмечалась для АЯГ рядом авторов (Шемер и др., 2008; Брайтман и др., 2013), но ставилась под сомнение в

Таблица 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	$7.3^{+0.8}_{-0.7}$
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	CPG		48.3, 55.0	10	$6.31^{+0.11}_{-0.11}$
2019-10-20	CPG		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	CPG		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	CPG		39.8	10	$8.40^{+0.07}_{-0.07}$

Примечание. Ссылки: (1) Тананбаум и др. (1986), (2) Нандра и др. (1995), (3) Джож и др. (2000), (4) Пейдж и др. (2004), (5) Хименес-Байлон и др. (2005), (6) Пиконсэли и др. (2005), (7) Харокорзо и др. (2007), (8) Парк и др. (2008), (9) Шеммер и др. (2014), (10) эта работа. L_X — поправленная за поглощение в Галактике светимость в диапазоне энергий 2–10 кэВ в системе отсчета квазара.

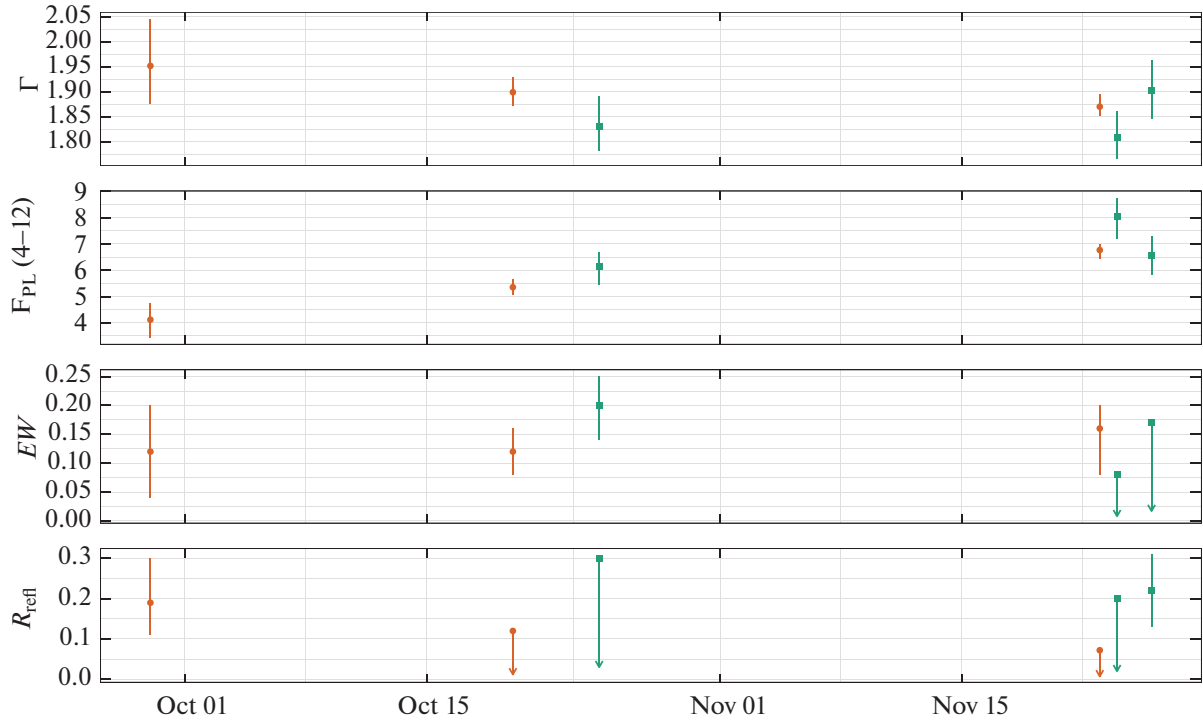


Рис. 8. Изменение параметров спектральной модели $PL + GAUSS + PEXRAV$ в ходе наблюдений обсерваторий CPT (оранжевый цвет) и XMM-Newton (зеленый цвет) осенью 2019 г. Показаны (сверху вниз): наклон степенной компоненты, поток в степенной компоненте (в единицах 10^{-13} эрг/с/см²), эквивалентная ширина линии железа и относительная нормировка отраженной компоненты (см. табл. 4 и 5).

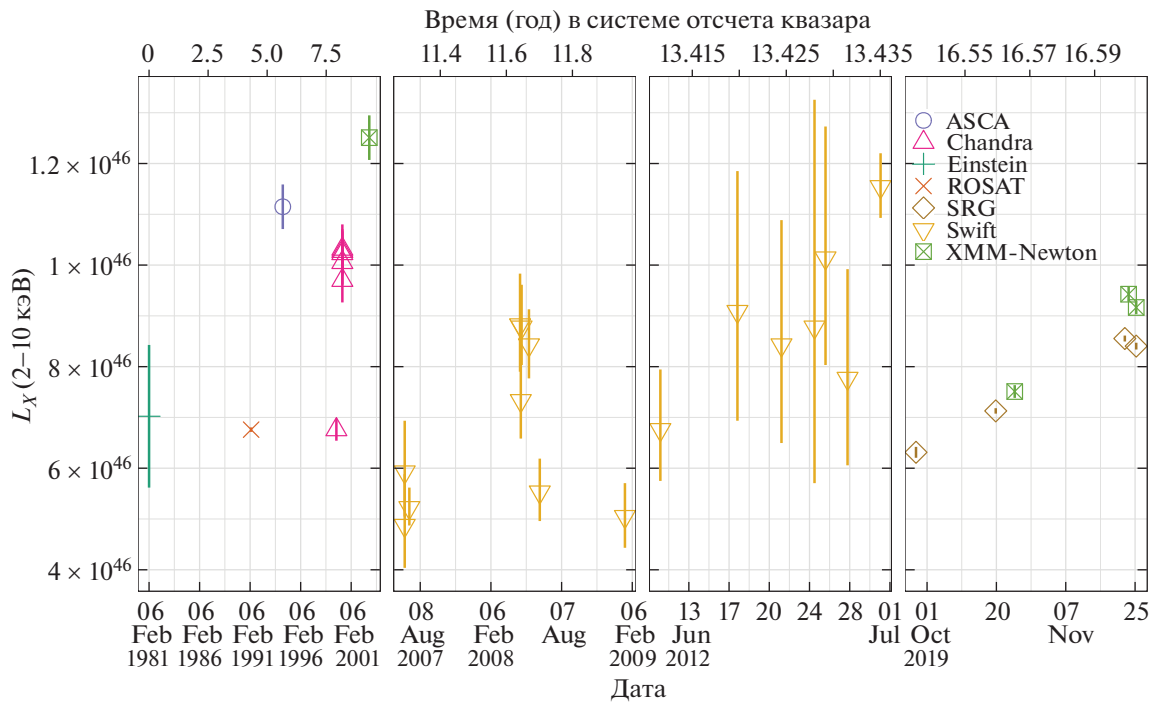


Рис. 9. Долговременная эволюция рентгеновской светимости квазара PG 1634+706. Светимость приведена в диапазоне энергий 2–10 кэВ в системе отсчета источника. Показаны 1σ -статистические погрешности измерений. На нижней оси отложены даты наблюдений, на верхней — время, прошедшее с момента первого наблюдения в системе покоя источника.

других работах (см., например, Трахтенброт и др., 2017).

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

Интересно рассмотреть эти результаты в общем контексте рентгеновской переменности АЯГ. В недавней работе Прохоренко и др. (2021) на основе представительной выборки ярких в рентгене квазаров из оптического спектроскопического обзора SDSS, по данным обзора всего неба СРГ/еРОЗИТА и архивным данным обсерватории ХММ-Newton было установлено, что характерная амплитуда рентгеновской переменности квазаров медленно растет со временем, но уменьшается со светимостью. Для квазаров со светимостью $\sim 10^{46}$ эрг/с характерная амплитуда переменности (отношение случайной пары потоков) на масштабах времени 10–20 лет составляет ~ 1.4 со значительной дисперсией от объекта к объекту. Таким образом, квазар PG 1634+706 не выглядит примечательным в том, что касается рентгеновской переменности, среди квазаров со сравнимой светимостью.

В исследовании были использованы данные телескопов ART-XC и еРОЗИТА на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ разработана в АО “НПО Лавочкина” (входит в госкорпорацию “Роскосмос”) при участии Германского центра авиации и космонавтики (DLR) в рамках Федеральной космической программы России по заказу Российской академии наук. Рентгеновский телескоп еРОЗИТА изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка при поддержке DLR. Команда телескопа ART-XC благодарит госкорпорацию “Роскосмос”, Российскую академию наук и госкорпорацию “Росатом” за поддержку разработки и создания телескопа ART-XC, а также АО “НПО Лавочкина” и партнеров за создание и работу с космическим аппаратом и платформой “Навигатор”. Используемые в настоящей работе

данные телескопа еРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом еРОЗИТА, и программного обеспечения для обработки и анализа данных, разработанного российским консорциумом телескопа еРОЗИТА. Это исследование было проведено при поддержке грантов РНФ 21-12-00343 и 19-12-00396 в части обработки данных телескопов еРОЗИТА и ART-XC соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананна и др. (T.T. Ananna, A.K. Weigel, B. Trakhtenbrot, M.J. Koss, C.M. Urry, C. Ricci, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **261**, 9 (2022).
2. Андерс, Гривес (E. Anders and N. Grevesse), *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 197 (1989).
3. Арно (K.A. Arnaud), in G.H. Jacoby and J. Barnes (eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 17 (1996).
4. Босэй и др. (R. Boissay, C. Ricci, and S. Paltani), *Astron. Astrophys.* **588**, A70 (2016).
5. Брайтман и др. (M. Brightman, J.D. Silverman, V. Mainieri, Y. Ueda, M. Schramm, K. Matsuoka, et al.), *MNRAS* **433**, 2485 (2013).
6. Васудеван и др. (R.V. Vasudevan and A.C. Fabian), *MNRAS* **381**, 1235 (2007).
7. Вилмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
8. Вилмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
9. Воан и др. (S. Vaughan, R. Edelson, R.S. Warwick, and P. Uttley), *MNRAS* **345**, 1271 (2003).
10. Грин и др. (R.F. Green, M. Schmidt, and J. Liebert), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **61**, 305 (1986).
11. Гуаницци и др. (M. Guainazzi and S. Bianchi), *MNRAS* **374**, 1290 (2007).
12. Джин и др. (C. Jin, M. Ward, C. Done, and J. Gelbord), *MNRAS* **420**, 1825 (2012).
13. Джозж и др. (I.M. George, T.J. Turner, T. Yaqoob, H. Netzer, A. Laor, R.F. Mushotzky, et al.), *Astrophys. J.* **531**, 52 (2000).
14. Джордж, Фабиан (I.M. George and A.C. Fabian), *MNRAS* **249**, 352 (1991).
15. Келли и др. (B.C. Kelly, J. Bechtold, J.R. Trump, M. Vestergaard, and A. Siemiginowska), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **176**, 355 (2008).
16. Кравчук и др. (C.M. Krawczyk, G.T. Richards, S.S. Mehta, M.S. Vogeley, S.C. Gallagher, K.M. Leighly, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **206**, 4 (2013).
17. Лайк и др. (B.W. Lyke, A.N. Higley, J.N. McLane, D.P. Schurhammer, A.D. Myers, A.J. Ross, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **250**, 8 (2020).
18. Мадиарз, Здыарски (P. Magdziarz and A.A. Zdziarski), *MNRAS* **273**, 837 (1995).
19. Малиция и др. (A. Malizia, S. Sazonov, L. Bassani, E. Pian, V. Beckmann, M. Molina, et al.), *New Astron. Rev.* **90**, 101545 (2020).

20. Миллер и др. (J.M. Miller), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **45**, 441 (2007).
21. Нандра и др. (K. Nandra, A.C. Fabian, W.N. Brandt, H. Kunieda, M.atsuoka, T. Mihara, et al.), *MNRAS* **276**, 1 (1995).
22. Наякшин и др. (S. Nayakshin, D. Kazanas, and T.R. Kallman), *Astrophys. J.* **537**, 833 (2000).
23. Неелеман и др. (M. Neeleman, J.X. Prochaska, J. Ribaud, N. Lehner, J.C. Howk, M. Rafelski, et al.), *Astrophys. J.* **818**, 113 (2016).
24. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
25. Парк и др. (T. Park, D.A. van Dyk, and A. Siemiginowska), *Astrophys. J.* **688**, 807 (2008).
26. Пейдж и др. (K.L. Page, J.N. Reeves, P.T. O'Brien, M.J.L. Turner, and D.M. Worrall), *MNRAS* **353**, 133 (2004).
27. Пиконсэли и др. (E. Piconcelli, E. Jimenez-Bailón, M. Guainazzi, N. Schartel, P.M. Rodríguez-Pascual, and M. Santos-Lleó), *Astron. Astrophys.* **432**, 15 (2005).
28. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
29. Прохоренко С.А., Сазонов С.Ю. Письма в Астрон. журн. **47**, 537 (2021) [S.A. Prokhorenko and S.Y. Sazonov, *Astron. Lett.*, **47**, 515 (2021)].
30. Ричардс и др. (G.T. Richards, M. Lacy, L.J. Storrie-Lombardi, P.B. Hall, S.C. Gallagher, D.C. Hines, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **166**, 470 (2006).
31. Ричи и др. (C. Ricci, B. Trakhtenbrot, M.J. Koss, Y. Ueda, I. Del Vecchio, E. Treister, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **233**, 17 (2017).
32. Росс, Фабиан (R.R. Ross and A.C. Fabian), *MNRAS* **358**, 211 (2005).
33. Сазонов и др. (S.Y. Sazonov, J.P. Ostriker, and R.A. Sunyaev), *MNRAS* **347**, 144 (2004).
34. Сазонов и др. (S. Sazonov, S.P. Willner, A.D. Goulding, R.C. Hickox, V. Gorjian, M.W. Werner, et al.), *Astrophys. J.* **757**, 181 (2012).
35. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
36. Тананбаум и др. (H. Tananbaum, Y. Avni, R.F. Green, M. Schmidt, and G. Zamorani), *Astrophys. J.* **305**, 57 (1986).
37. Тёрнер и др. (T.J. Turner, I.M. George, K. Nandra, and D. Turcan), *Astrophys. J.* **524**, 667 (1999).
38. Трахтенброт и др. (B. Trakhtenbrot, C. Ricci, M.J. Koss, K. Schawinski, R. Mushotzky, Y. Ueda, et al.), *MNRAS* **470**, 800 (2017).
39. Харокорзо и др. (S.A.R. Haro-Corzo, L. Binette, Y. Krongold, E. Benitez, A. Humphrey, F. Nicastro, et al.), *Astrophys. J.* **662**, 145 (2007).
40. Хименес-Байлон и др. (E. Jiménez-Bailón, E. Piconcelli, M. Guainazzi, N. Schartel, P.M. Rodríguez-Pascual, and M. Santos-Lleó), *Astron. Astrophys.* **435**, 449 (2005).
41. Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин П.А., Ткаченко А.Ю., Письма в Астрон. журн. **38**, 539 (2012) [G.A. Khorunzhev, S.Y. Sazonov, R.A. Burenin, and A.Y. Tkachenko, *Astron. Lett.* **38**, 475 (2012)].
42. Шакура, Сюняев (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **24**, 337 (1973).
43. Шеммер и др. (O. Shemmer, W.N. Brandt, H. Netzer, R. Maiolino, and S. Kaspi), *Astrophys. J.* **682**, 81 (2008).
44. Шеммер и др. (O. Shemmer, W.N. Brandt, M. Paolillo, S. Kaspi, C. Vignali, M.S. Stein, et al.), *Astrophys. J.* **783**, 116 (2014).
45. Шенг и др. (Z. Shang, M.S. Brotherton, B.J. Wills, D. Wills, S.L. Cales, D.A. Dale, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **196**, 2 (2011).
46. Элвис и др. (M. Elvis, B.J. Wilkes, J.C. McDowell, R.F. Green, J. Bechtold, S.P. Willner, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **95**, 1 (1994).
47. де Роса и др. (A. de Rosa, F. Panessa, L. Bassani, A. Bazzano, A. Bird, R. Landi, et al.), *MNRAS* **420**, 2087 (2012).
48. Элвис и др. (M. Elvis, F.J. Lockman, and B.J. Wilkes), *Astron. J.* **97**, 777 (1989).
49. Янсен и др. (F. Jansen, D. Lumb, B. Altieri, J. Clavel, M. Ehle, C. Erd, et al.), *Astron. Astrophys.* **365**, L1 (2001).