

УДК 524.7+52-735

Е. В. Федорова, В. И. Жданов

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета им. Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев 04053
efedorova@ukr.net, valeryzhdanov@gmail.com

**Вариации рентгеновского спектра
активного ядра галактики NGC 4945
по данным космической обсерватории INTEGRAL**

Обработаны результаты одиннадцатилетних рентгеновских наблюдений ядра сейфертовской галактики NGC 4945 в диапазоне 3...500 кэВ с борта КА INTEGRAL. Для анализа использована двухкомпонентная модель наблюдаемого спектра, учитывающая сильное поглощение излучения комптоновски-толстым тором вокруг центральной машины АЯГ, и вторичное излучение, отраженное от стенок тора. По данным всей экспозиции получены следующие параметры первичного спектра: наклон $\alpha = 1.60 \pm 0.07$, энергия экспоненциального обрезания $E_c = 157^{+29}_{-22}$ кэВ, столбцовая плотность среды, поглощающей первичное излучение, $N_{H,1} = 5.0^{+1.0}_{-0.9} \cdot 10^{24}$ см⁻². Столбцовая плотность среды, поглощающей отраженное излучение оказывается на два порядка меньше. Рентгеновское излучение NGC 4945 испытывает как вариации потока в диапазонах 20...40, 40...60 и 60...100 кэВ, так и вариации формы спектра. Последние, в частности, могут быть обусловлены неоднородностью поглощающей среды, окружающей АЯГ. Вместе с тем, есть указания на умеренные вариации спектра в высокоэнергетичной области, которые могут быть связаны с изменениями в «центральной машине».

ВАРІАЦІЇ РЕНТГЕНІВСЬКОГО СПЕКТРУ АКТИВНОГО ЯДРА ГАЛАКТИКИ NGC 4945 ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ INTEGRAL, Федорова О. В., Жданов В. І. — Опрацьовано результати одинадцятирічних спостережень ядра сейфертівської галактики NGC 4945 в діапазоні 3...500 кеВ з борту КА INTEGRAL. Для аналізу використано двокомпонентну модель спостережного спектру, що враховує сильне поглинання випромінювання комптонівськи-товстим

тором навколо центральної машини АЯГ, і вторинне випромінювання, відбите від стінок тора. Параметри первинного спектру отриманого за весь час спостережень: нахил спектру $\Gamma = 1.6 \pm 0.07$, енергія експоненційного завалу $E_c = 157^{+29}_{-22}$ keV, стовпчикова густина поглинального середовища для первинного випромінювання $N_{H,1} = 5.0^{+1.0}_{-0.9} \cdot 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Стовпчикова густина поглинання для відбитого випромінювання на два порядки нижча. Рентгенівське випромінювання NGC 4945 змінюється як у потоках у смугах 20...40, 40...60 и 60...100 keV, так і по формі спектру. Останнє може бути пояснене як наслідок неоднорідностей середовища, що оточує ядро. Але в той же час є ознаки того, що помірні спектральні варіації у високоенергетичному діапазоні можуть бути пов'язані зі змінами умов у «центральної машині».

VARIATIONS OF THE X-RAY SPECTRUM OF AGN NGC 4945 FROM THE DATA OF INTEGRAL SPACE MISSION, by Fedorova E. V., Zhdanov V. I. — The results of the 3...500 keV 11-year INTEGRAL monitoring of NGC 4945 are treated. To analyze them we applied a two-component spectral model, consisting of a direct nuclear emission absorbed in the Compton-thick circumnuclear torus and a reprocessed one, reflected from inner torus walls. Parameters of full-time exposure spectrum are: photon index $\Gamma = 1.6 \pm 0.07$, high-energy cut-off $E_c = 157^{+29}_{-22}$ keV, column density of absorbing medium $N_{H,1} = 5.0^{+1.0}_{-0.9} \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ for the direct emission and two orders lower for the reprocessed one. Both the X-ray flux and spectral shape of NGC 4945 vary. The spectral shape changes can be caused by inhomogeneities of the absorbing medium surrounding the nucleus. But in the same time there are some signs of moderate variations in high-energy range, inflicted by changes of physical conditions in the “central engine”.

ВВЕДЕНИЕ

Спиральная галактика NGC 4945 — одна из наиболее ярких сейфертов II типа, видимая практически с ребра; красное смещение $z = 0.0019$ [28]. Она имеет активное ядро и области звездообразования [24]. NGC 4945 является также источником субъядерного мегамазерного излучения H_2O ; при помощи РСДБ-наблюдений определена центральная масса $1.4 \cdot 10^6 M_\odot$ внутри сферического объема радиусом 0.3 пк [9]. Благодаря сильному поглощению в рентгеновском диапазоне [5, 13], NGC 4945 является интересным объектом для изучения и сравнения разных моделей активных ядер галактик (АЯГ), особенно в плане рассеяния на молекулярном торе, окружающем «центральную машину».

Исследование процессов поглощения в торе [29], основанное на данных наблюдений спутников «Swift/BAT», «VerroSAX» и «Сузаку», указывают на комкообразную структуру с фактором покрытия не

более 10 %. Спектр NGC 4945 содержит набор линий железа между 6 и 8 кэВ, форма которых используется для оценок параметров центральной черной дыры [16, 17, 29]. Несмотря на заметные вариации первичного континуума выше 10 кэВ, обнаруженные в [17] на основе нескольких наблюдений «Сузаку», вариации в линиях составили не более 10 % в течение наблюдений. Согласно интерпретации работы [29], все эти линии являются результатом переработки первичного излучения центральной машины в неоднородной комптоновски-толстой среде вокруг ядра. Первая модель спектра NGC 4945 во всем диапазоне 0.1...200 кэВ по данным «ВерроSAX» построена в работе [10]; на основе трехдневных наблюдений авторы выяснили, что этот спектр содержит три основные части: (i) первичное излучение «центральной машины», сильно поглощаемое тором, (ii) отраженный или рассеянный первичный континуум, слегка поглощаемый в галактике или в межгалактическом пространстве, (iii) тепловое излучение из области балджа. Полученное при этом значение энергии экспоненциального обрезания $E_c = 110^{+130}_{-30}$ кэВ, наклон спектра $\alpha = 15^{+0.3}_{-0.4}$, поверхностная плотность поглощающей среды (для первичного континуума) $N_H = 3.9^{+0.8}_{-0.9} 10^{24} \text{ см}^{-2}$.

Первые наблюдения рентгеновского спектра NGC 4945 при помощи КА INTEGRAL (январь 2003 — январь 2004) в области энергий 20...200 кэВ [25], показали наклон $\alpha = 1.9 \pm 0.1$ при фиксированном значении $N_H = 4 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-2}$. В работе [25] выявлены суточные 20 % вариации кривых блеска на 20...40 кэВ при отсутствии вариаций на 40...60 кэВ. Однако результаты первого года наблюдений NGC 4945 [25] имели недостаточную статистику для исследования тонких спектральных особенностей. В работе [18] проанализирован высокоэнергетический спектр на основе наблюдений «Сузаку», INTEGRAL и «Ферми». Для жесткого компонента рентгеновского спектра было найдено $\alpha = 0.4$ и $E_c = 150$ кэВ (здесь рассматривался степенной спектр с поглощением и экспоненциальным обрезанием).

В настоящей работе дан детальный анализ большего набора рентгеновских данных, полученных космической обсерваторией INTEGRAL, используя все имеющиеся наблюдения NGC 4945 вплоть до января 2014 г. Это позволило проанализировать не только вариации потока, но и форму спектра. Заметим, что предварительный анализ меньшего объема данных проделан нами в работе [7].

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Сводка рентгеновских наблюдений с борта КА INTEGRAL при помощи двух датчиков JEM-X и датчика IBIS/ISGRI дана в табл. 1. Выборка включает общедоступные данные за период с 2003 по 2013 гг., т. е. 2674 научных окна ScW для прибора IBIS/ISGRI (ScW соответствует набору данных, полученных, как правило, в течение наблюдений дли-

Таблица 1. График наблюдений NGC 4945

Data revs	Дата	UTC начала	Экспозиция, с		
			ISGRI	JEM-X1	JEM-X2
0046-0049	2003-03-02	09:58	153.5	0	6.9
0076-0092	2003-05-30	00:54	361.3	0	0
0146-0150	2004-12-24	08:18	4.3	0	59.5
0157-0197	2004-01-26	11:38	337.0	0	12.6
0201-0235	2004-06-05	19:16	55.7	0	0
0258-0284	2004-11-23	13:13	100.2	0	0
0322-0349	2005-06-09	01:42	973.7	0	0
0350-0399	2005-08-25	12:04	160.8	41.6	0
0400-0446	2006-01-22	09:42	213.7	116.8	1.8
0455-0477	2006-07-06	15:36	108.7	0	0
0514-0531	2006-12-29	20:19	1331.2	0	0
0573-0588	2007-06-25	06:37	372.5	0	0
0636-0648	2007-12-31	03:31	298.4	40.0	0
0651-0699	2008-02-11	21:25	233.1	0	0
0700-0719	2008-07-08	20:42	780.4	0	0
0764-0776	2009-01-15	20:50	415.1	13.6	0
1007-1124	2011-01-14	05:22	96.8	1.4	1.4
1131-1200	2012-01-17	11:37	490.0	0	0
1306-1318	2013-06-23	22:46	53.9	0	0
Всего	03/2003 — 07/2013		6541.3	213.4	72.3

тельностью 2 кс). Для обоих приборов JEM-X это 61 и 30 научных окон соответственно. Все время экспозиции ISGRI для использованных данных составило 6.5 Мс, когда наблюдаемый объект был под углом менее 15° от оси прибора. Меньшая выборка имеется от двух рентгеновских датчиков JEM-X с суммарным временем экспозиции 0.3 Мс для углов менее 5°).

Мы проанализировали данные, полученные с помощью датчиков IBIS/ISGRI при помощи программного обеспечения Off-line Scientific Analysis (OSA) v.10.0, которое предоставляет центр данных КА INTEGRAL (ISDC) [3]. Используются стандартные алгоритмы работы со спектрами, получаемыми IBIS/ISGRI и JEM-X. Все спектры получены индивидуально для каждого научного окна с последующим суммированием. Источник рентгеновского излучения детектировался ISGRI до энергий около 500 кэВ, хотя реально мы ограничивались областью до 200 кэВ, где было достаточное число отсчетов. Для учета неопределенностей интеркалибровки использовалась 3 %-я систематика спектров INTEGRAL. Достоверности детектирования составили 163.7 (20...40 кэВ), 135.7 (40...60 кэВ), 91.8 (60...100 кэВ) и 31 (100... 200 кэВ). Для данных JEM-X также использовались программы OSA. Полученные спектры показаны на рис. 1. Разброс экспериментальных данных оценивался по пуассоновской статистике с учетом числа зарегистрированных фотонов в каждом спектральном канале за

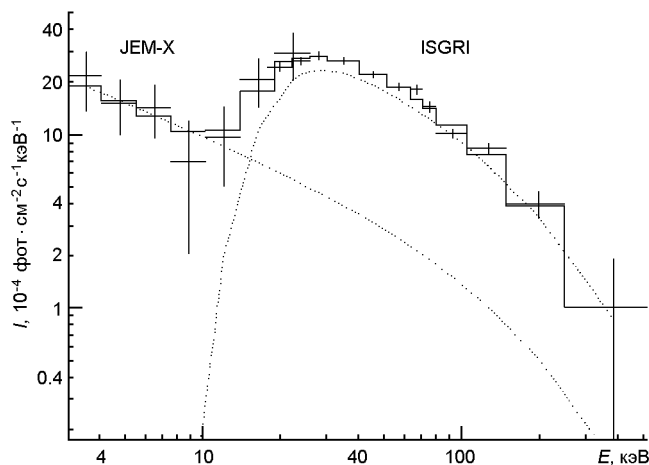


Рис. 1. Спектры ISGRI и JEM-X (вся экспозиция)

все время экспозиции. Как видно из рис. 1, имеем удовлетворительную подгонку модельного спектра.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Вариации потока. Кривые блеска, полученные на IBIS/ISGRI, разбиты по четырем диапазонам энергий 20...40 кэВ, 40...60 кэВ, 60...100 кэВ и 100...200 кэВ. Дискретизация по времени варьировалась от 0.5 до 30 сут, в зависимости от времен экспозиции отдельных орбитальных витков КА INTEGRAL. Усреднение производилось по времени каждого оборота или по группе соседних витков. Наиболее высококачественные участки кривых блеска в трех диапазонах энергий показаны на рис. 2. Уровень ошибок здесь определялся по статистике Пуассона по числу отсчетов в каждом энергетическом диапазоне. Здесь хорошо видны вариации блеска, причем их вид отличается в разных диапазонах. Оценки соответствующих коэффициентов корреляций показаны в табл. 2.

Параметры спектра для всей экспозиции. Суммарный спектр датчиков ISGRI + JEM-X покрывает интервал энергий примерно от 3 до 300 кэВ, поэтому мы рассматриваем только два компонента из трехкомпонентной модели, использованной для спектра NGC 4945 в работах [10, 24], полученного обсерваториями «ВерроSAX», «XMM-Ньютон» и «Чандра»:

- 1) модель $\text{cutoffpl} * \text{zphabs}$ для первичного излучения центральной машины, сильно поглощаемого комптоновски-толстым тором вокруг центральной черной дыры;
- 2) модель $\text{reghav} * \text{zphabs}$ для первичного континуума, отражаемого от «внутренних стенок» этого тора, которые видны наблюдателю [15].

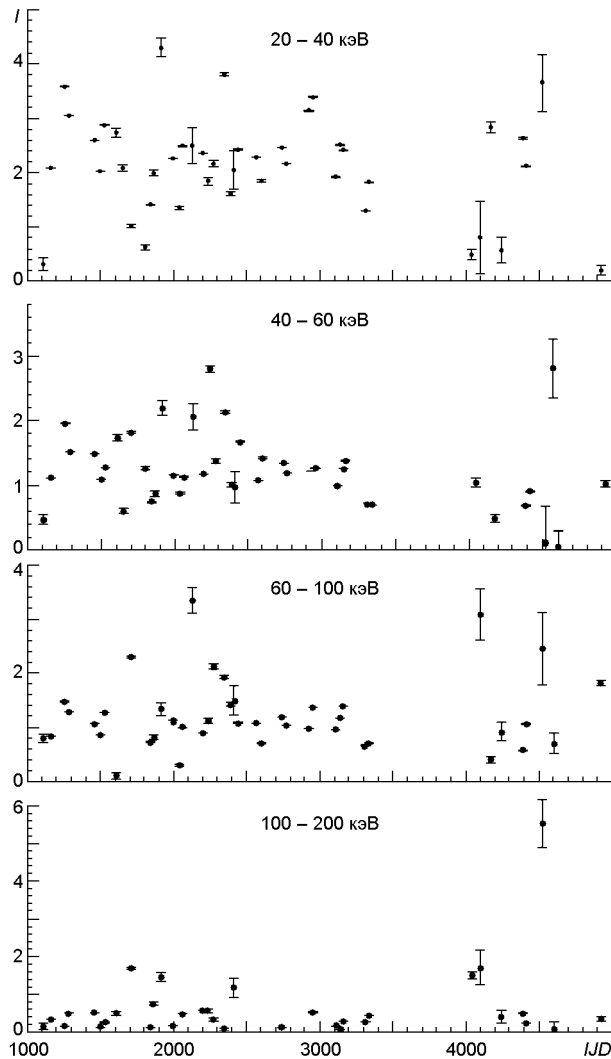


Рис. 2. Кривые блеска от NGC 4945 в четырех диапазонах энергий ISGRI с 2006 по 2013 г. Время дано в юлианских днях IJD (INTEGRAL Julian Days) с началом отсчета 1 января 2000 г.

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции блеска в трех диапазонах $A = 20...40$ кэВ, $B = 40...60$ кэВ, и $C = 60...100$ кэВ, для трех дискретизаций (D , IJD) по времени. Стандартные отклонения оценивались по методу складного ножа (jackknife)

IJD	r_{AB}	r_{BC}	r_{AC}
0.5	0.50 ± 0.06	0.28 ± 0.10	0.16 ± 0.09
1	0.38 ± 0.12	0.28 ± 0.18	0.14 ± 0.06
3	0.51 ± 0.09	$0.19 \pm 0.11^*$	-0.02 ± 0.10

В суммарной модели, которая описывает первичное и переработанное излучение центральной машины, оба компонента имеют одинаковые значения наклона (фотонного индекса) и параметра высокоэнергетического экспоненциального обрезания E_c . Здесь мы не учитываем тепловой компонент, который проявляется на энергиях ниже

Таблица 3. Характеристики комбинированного спектра ISGRI и JEM-X для полной экспозиции с доверительными интервалами 90 %

Параметр	Значение	При фиксированном R	При фиксированном E_c	При фиксированном E_c , без обрезания
χ^2 /d.o.f	11.3/11	11.4/12	12.0/12	13.4/12
E_c , кэВ	1.6 ± 0.07	1.63 ± 0.06	$1.76^{0.09}_{0.11}$	$1.94^{0.16}_{0.24}$
R	157^{29}_{22}	166^{32}_{24}	300	
$\cos i$	$0.05^{0.95}_{0.60}$	0	$2.8^{3.9}_{1.8}$	$12.9^{36.0}_{6.0}$
$N_{H,1}$, 10^{24} см ²	$0.78^{0.17}_{0.73}$	0.5 ± 0.45	$0.48^{0.47}_{0.33}$	$0.95^{0.05}_{0.38}$
$N_{H,2}$, 10^{22} см ²	$5.0^{1.0}_{0.9}$	$5.1^{0.9}_{1.0}$	$6.6^{2.1}_{1.5}$	$12.9^{36.0}_{6.0}$
K_X	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3

3 кэВ. Также в соответствующей области не были введены в рассмотрение линии железа ввиду недостаточного качества спектра в этой области, получаемого JEM-X.

Подгонка спектров NGC 4945, измеренных ISGRI и JEM-X, была проведена при помощи программного пакета XSPEC 12 комплекса HEASoft 6.14 [2]. Для стыковки разных периодов наблюдений и учета неопределенности при кросс-калибровке вводился множитель интеркалибровки K_X для спектра JEM-X относительно спектра ISGRI. Полученные значения подгоночных параметров с доверительными интервалами 90 % приведены в табл. 3 (графа 2). В графах 3 и 4 приведены значения подгоночных параметров, рассчитанные при фиксированных величинах R и E_c соответственно, в графе 5 — значения параметров, полученные без экспоненциального обрезания. Видно, что фотонный индекс имеет тенденцию к возрастанию при увеличении E_c и переходе к модели без экспоненциального обрезания, что, естественно, сопровождается ухудшением качества подгонки (см. χ^2 /d.o.f., первая строка таблицы). Заметим, что коэффициент корреляции $\cos i$ и E_c равен 0.76, тогда как корреляция N_H с E_c слабее (коэффициент корреляции 0.14 и 0.08 соответственно).

Вариации спектральной формы. В работе [16] было показано, что спектральные вариации в области около 10 кэВ вызваны временными вариациями столбцовой плотности водорода на луче зрения. Для анализа спектральных вариаций на более высоких энергиях на основе данных INTEGRAL мы подгоняли по отдельности спектры IBIS/ISGRI, полученные в течение $N_{sp} = 29$ последовательных периодов времени (определяемых условием достаточной статистики). Для каждого периода получена оценка отношения HR (hardness ratio) величины потока F в разных диапазонах энергий, где

$$HR = \frac{F_{150...500 \text{ кэВ}}}{F_{80...150 \text{ кэВ}}}$$

Здесь мы ограничились областью выше 80 кэВ, чтобы свести к минимуму влияние поглощения и отражения и акцентировать внимание на

Таблица 4. Параметры наилучшей аппроксимации для пяти периодов

Период	L/D		E_c , кэВ	$N_{H,1}$, 10^{24} см ⁻²
A	1282.6...1517.3	1.57 0.1	124 ⁶² ₃₈	14.0 5.0
B	1694.1...2583.7	2.05 0.09	> 600	8.8 3.0
C	2745.2...3140	0.93 0.14	65 ¹⁰ ₇	2.3 1.4
D	3146.4...3307.2	1.62 0.22	> 330	3.3 3.0
E	3312.8...4959.2	1.27 0.14	155 ⁹⁰ ₄₅	3.6 1.9

параметрах E_c , которые описывают вариации первичного спектра. Чтобы обеспечить максимальную однородность по разным периодам времени, данные JEM-X в этих оценках не использовались, поскольку они покрывают лишь ограниченную часть наблюдений ISGRI.

Сначала мы попытались оценить вариации этих параметров, разбив все время экспозиции на отдельные временные интервалы. Были использованы те же модели, что и для всей экспозиции. Вместе с тем параметр отражения был фиксирован величиной $R = 0.03$, поскольку за период всех наблюдений не следует ожидать существенных изменений как этого параметра, так и угла наклона к лучу зрения. Также была фиксировано значение столбцовой плотности отраженной части $N_{H,2} = 2.2 \cdot 10^{22}$ см⁻² ввиду того, что эта величина достаточно мала, чтобы не влиять на форму спектра выше 20 кэВ. Остальные параметры: фотонный индекс Γ , энергия обрезания E_c и столбцовая плотность $N_{H,1}$ оставались свободными. Результаты для 29 интервалов показали, что количество отсчетов в них недостаточно для хорошей подгонки. Поэтому соседние интервалы были сгруппированы последовательно в пять больших по времени интервалов A, B, C, D, E. Соответствующие времена показаны в табл. 4.

Полученные результаты могут быть свидетельством в пользу вариаций со временем именно первичного рентгеновского спектра NGC 4945, описываемых наклоном и энергией обрезания. Эти вариации обусловлены изменениями в короне. Однако, как уже отмечалось, параметры Γ и E_c сильно коррелируют, т. е. одновременные вариации этих параметров могут быть следствием ошибок. Однако вычисления с фиксированным параметром свидетельствуют, что и в этом случае вариации Γ или E_c остаются достоверными, т. е. они вызваны вариациями первичного спектра. Если бы вариации этих параметров имели случайное, шумовое происхождение, этого бы не было.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе проведена обработка данных одиннадцатилетних рентгеновских наблюдений комптоновски плотной галактики NGC 4945 типа S2, полученных космической обсерваторией INTEGRAL.

Спектр всей экспозиции удовлетворительно аппроксимируется моделью, в которой первичный степенной спектр трансформируется в

два компонента: часть, соответствующую отраженному от «стенок» тора ($R = 0.03^{1.63}_{0.62}$) мало поглощаемому ($N_{H,2} < 7 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$) излучению центральной машины, и основная часть, соответствующая прямому излучению, которое проходит к наблюдателю через сильно поглощающий/рассеивающий тор ($N_{H,1} = 5.0^{10}_{0.9} \cdot 10^{24} \text{ см}^{-2}$). Фотонный индекс и энергия экспоненциального обрезания первичного излучения составили $E_c = 157^{29}_{22} \text{ кэВ}$, $\alpha = 1.6 \pm 0.07$. Фотонный индекс и энергия обрезания, полученные здесь, согласуются в пределах ошибок с наблюдениями «ВерроSAX» [10], хотя значение внутреннего поглощения немного выше. Последнее укладывается в картину значительных вариаций N_H в рассматриваемом АЯГ, вероятно в связи с неоднородной структурой тора [12, 17]. Энергия экспоненциального обрезания для всей экспозиции оказалась ниже результатов [12], полученных на основе наблюдений «Сузаку». Параметр отражения R , грубая оценка которого дана в табл. 3, также согласуется с устойчивой верхней оценкой 0.07, полученной в работе [16] из нескольких наблюдений «Сузаку». Отметим, что в работе [24] получено значение $R = 0.029 \pm 0.003$ в интервале энергий до 6 кэВ по данным «ХММ-Ньютон» и «Чандра».

Данные для отдельных временных интервалов свидетельствуют как о вариациях потока, так и о вариациях спектральной формы в диапазоне 20...500 кэВ. В частности, последнее показывает модельно-независимый анализ на основе отношений HR . Существенные вариации HR хорошо видны на рис. 3, где они показаны по интервалам в зависимости от потока в области 80...150 кэВ. Заметим, что здесь довольно четко наблюдается группировка данных в верхней и нижней частях рисунка. Полный поток слабо коррелирует с изменениями этой формы (по крайней мере до энергий 200 кэВ).

Эти данные, однако, не позволяют судить по отдельности о вариациях параметров α , E_c и $N_{H,1}$, которые могут быть связаны с разными физическими причинами. Одной из причин вариаций мягкого рентгеновского компонента в сейфертах II типа являются изменения столбцовой плотности в поглощающей среде на луче зрения [23]. В комптоновски плотном АЯГ поглощение может влиять на спектр и при более высоких энергиях, примерно до 50 кэВ. NGC 4945 не является исклю-

Таблица 5. Значения параметров спектра для разных периодов при замороженных значениях E_c (графы 2, 3) и α (графы 4, 5). Погрешности даны с доверительной вероятностью 90 %

Период	$E_c = 157 \text{ кэВ}$		$\alpha = 1.6$	
	α	$N_{H,1}^a, 10^{24} \text{ см}^{-2}$	$E_c, \text{ кэВ}$	$N_{H,1}^a, 10^{24} \text{ см}^{-2}$
A	$1.81^{0.14}_{0.13}$	15.9 ± 3.2	113^{21}_{16}	14.4 ± 5.0
B	$1.62^{0.13}_{0.12}$	7.6 ± 3.0	161^{54}_{35}	7.1 ± 2.6
C	$1.6^{0.21}_{0.17}$	9.8 ± 6.2	149^{59}_{35}	11.0 ± 5.5
D	$1.21^{0.14}_{0.18}$	< 2.6	> 300	$1.7^{3.0}_{1.3}$
E	$1.27^{0.16}_{0.17}$	3.8 ± 1.9	> 200	4.6 ± 1.9

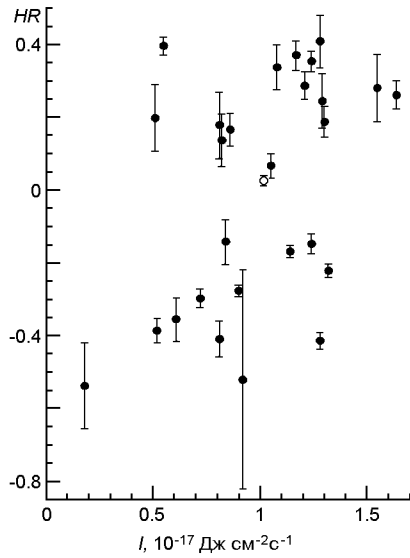


Рис. 3. Зависимость параметра HR для разных периодов от потока I в области 80—150 кэВ. Значение для всей экспозиции отмечено светлым кружком

чением: вариации, вызванные поглощением, обнаружены для этого объекта в работе [16] по данным Suzaku в диапазоне до 10 кэВ. Найденные при этом значения N_H показывают вариации в два и более раз. Изменения внутреннего поглощения на этом уровне могут объяснить изменения спектра в области 10...40 кэВ [16].

Отметим, что наблюдения «Сузаку» выявили вариации первичного континуума в течение часов [11, 12]. Эти вариации были объяснены в терминах отражения от холодной нейтральной среды, расположенной на значительном расстоянии от центра АЯГ (вероятно, от «стенок» тора). В нашем случае для значительно больших характерных времен отражение относительно мало влияет на остальные параметры, по крайней мере в пределах $R = -1.0...2.5$). Таким образом, здесь необходимо учитывать другие факторы.

Реальны ли изменения в центральной машине АЯГ NGC 4945, которые, помимо поглощения, также влияют на форму спектра в области до 100 кэВ и более? Здесь выводы менее определенные. Хотя изменения параметров α , E_c в табл. 4 выглядят значительными, это может быть следствием сильной корреляции между ними. Тем не менее, результаты обработки с замороженными параметрами в табл. 5 все-таки указывают на умеренные изменения в центральной машине; хотя наш анализ не позволяет оценить вариации α и E_c по отдельности.

Подобные изменения вполне возможны в свете того, что NGC 4945, будучи радиотихим объектом [9], демонстрировал некоторую активность во время наблюдательной кампании 2006—2007 гг. [14]. Не исключено, что NGC 4945 занимает промежуточное место между радиотихими и радиогромкими объектами.

Наличие струй и активность АЯГ в радиодиапазоне коррелирует с наличием завала ($E_c < 100$ кэВ) в высокоэнергетической части рентгеновского спектра, порождаемого в центральной области АЯГ и указывающего на выметание вещества из этой области [8]. Для радиотихих

объектов такого обрезания быть не должно. Это обстоятельство известно как «спин-парадигма», поскольку наличие высокоэнергетического обрезания ассоциируется с высоким значением спина керровской черной дыры в центре АЯГ и направлением вращения аккреционного диска. Вместе с тем имеются аномальные объекты, которые ставят под сомнение спин-парадигму или требуют ее уточнения [4, 6, 9, 25—27]. Вероятно, в эту группу следует отнести и NGC 4945, однако для уверенного ответа необходимы дополнительные наблюдения как в радио-, так и в рентгеновском диапазоне. Особый интерес представляет оценка вариаций параметра обрезания E_c .

ВЫВОДЫ

Мы проанализировали рентгеновский спектр NGC 4945, полученный КА INTEGRAL за период от марта 2003 до июля 2013. Основные результаты можно резюмировать следующим образом.

1. Рентгеновское излучение NGC 4945 испытывает вариации потока в диапазонах 20...40, 40...60 и 60...100 кэВ с характерными временами порядка суток (это минимальное разрешение по времени для КА INTEGRAL); вариации в указанных диапазонах некоррелированы.

2. Наблюдаются изменения формы спектра потока в области 20...500 кэВ; оцениваемая вероятность, что эти изменения являются результатом стохастических факторов при измерениях по разным тестам составляет от 0.1 до 2 %.

3. Указанные изменения в основном обусловлены вариациями поглощения, что указывает на комковатую структуру поглощающей среды вокруг АЯГ. Вместе с тем анализ формы спектра в области высоких энергий указывает на возможность умеренных изменений со временем, которые, по-видимому, нельзя объяснить только поглощением в торе.

4. Целесообразно провести параллельные рентгеновские и радионаблюдения NGC 4945 в течение продолжительного времени и с большей точностью.

В данной работе были использованы данные Центра архивации данных астрофизики высоких энергий, поддерживаемого NASA/Goddard Space Flight Center. Е. Федорова благодарна Киевскому центру VIRGO.UA за предоставление информационных и технических средств.

1. *Эфрон Б.* Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. — М.: Финансы и статистика, 1988.—263 с.
2. *Arnaud K. A.* XSPEC: The first ten years // ASP Conf. Ser.: Astronomical Data Analysis Software and Systems V / Eds G. H. Jacoby, J. Barnes.—1996.—**101**.—P. 17—20.
3. *Courvoisier T. J.-L., Walter R., Beckmann V., et al.* The INTEGRAL Science Data Centre (ISDC) // Astron. and Astrophys.—2003.—**411**.—L53.

4. *De Rosa A., Bassani L., Ubertini P., et al.* An X-ray view of absorbed INTEGRAL AGN // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**483**.—P. 749—758.
5. *Done C., Madejski G. M., Smith D. A.* NGC 4945: the brightest Seyfert 2 galaxy at 100 keV // *Astron. J. Lett.*—1998.—**463**, N 2.—P. L63.
6. *Fedorova E., Beckmann V., Neronov A., Soldi S.* Studying the long-time variability of the Seyfert 2 galaxy NGC 4388 with INTEGRAL and Swift // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**417**.—P. 1140.
7. *Fedorova E. V., Zhdanov V. I.* Radio quiet AGN properties vs. spin-paradigm: The case of NGC 4945 // *Galaxies: Evolution, Morphology and Dynamics* / Eds A. Guerrero Sanchez, R. E. Delgado Marquez. — Nova Publishers, 2012.
8. *Garofalo D., Evans D. A., Sambruna R. M.* The evolution of radio-loud active galactic nuclei as a function of black hole spin // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**406**.—P. 975.
9. *Greenhill L. J., Moran J. M., Herrnstein J. R.* The distribution of H₂O maser emission in the nucleus of NGC 4945 // *Astron. J.*—1997.—**481**, N 1.—L23—L26.
10. *Guainazzi M., Matt G., Brandt W. N., et al.* A broad-band X-ray view of NGC 4945 // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**356**.—P. 463—474.
11. *Isobe N., Kubota A., Makishima K., Ganghi P., et al.* Discovery of a bright transient ultraluminous X-ray source, Suzaku J1305-4931 in NGC 4945 // *Publs. Astron. Soc. Jap.*—2008.—**60**, N Sp1.—P. S241—S250.
12. *Itoh T., Done C., Makishima K., et al.* Suzaku wide-band X-ray spectroscopy of the Seyfert2 AGN in NGC 4945 // *Publs. Astron. Soc. Jap.*—2008.—**60**, N Sp1.—P. S251—S261.
13. *Iwasawa K., Awaki H., Yaqoob T.* New horizon of X-ray astronomy. First results from ASCA // *Procs Int. Conf. X-ray Astronomy, Tokyo, Japan. FSS-12* / Eds Fumiyoshi Makino, Takaya Ohashi. — Universal Academy Press Inc., 1994.—P. 581.
14. *Lenc E., Tingay S. J.* The sub-parsec scale radio properties of southern starburst galaxies. II. Supernova remnants, the supernova rate, and the ionised medium in the NGC 4945 starburst // *Astron. J.*—2009.—**137**.—P. 537.
15. *Magdziarz P., Zdziarski A. A.* Angle-dependent Compton reflection of X-rays and gamma-rays // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—**273**.—P. 837—848.
16. *Marinucci A., Risaliti G., Nardini E., et al.* The unique Suzaku discovery of variability in the Compton-thick absorber in NGC 4945 // *SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conf. Proc.*—2012.—1427.—P. 141.
17. *Marinucci A., Risaliti G., Wang J., et al.* The X-ray reflector in NGC 4945: a time- and space-resolved portrait // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Lett.*—2012.—**423**.—P. L6.
18. *Menzel M.-L., Beckmann V., Mattana F.* Emission processes in NGC 4945 // *PoS SISSA, Extreme sky 2011.*—2012.—075.
19. *Molina M.* PhD thesis, Broad-band spectral analysis of a complete sample of type 1 AGN detected by INTEGRAL // *University of Southampton, School of Physics and Astronomy, Doctoral Thesis.*—2009.—181 p.
20. *Morrison R., McCammon D.* Interstellar photoelectric absorption cross sections, 0.03—10 keV // *Astron. J.*—1983.—**270**.—P. 119—122.
21. *Ricci C., Walter R., Courvoisier T. J.-L., Paltani S.* Reflection in Seyfert galaxies and the unified model of AGN // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**532**.—A102.—20 p.
22. *Risaliti G.* The BeppoSAX view of bright Compton-thin Seyfert 2 galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**386**, N 2.—P. 379—398.
23. *Risaliti G.* The physical properties of X-ray absorbers in AGNs // *Proc. IAU Symp.*—2009.—**267**.—P. 119.

24. *Schurch N., Roberts T., Warwick R.* High-resolution X-ray imaging and spectroscopy of the core of NGC 4945 with XMM-радио and Chandra // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**335**.—P. 241.
25. *Soldi S., Beckmann V., Bassani L., et al.* INTEGRAL observations of six AGN in the Galactic Plane // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**444**, N 2.—P. 431—441.
26. *Soldi S., Beckmann V., Gehrels N., De Jong S., Lubin'ski P.* High-energy emission from NGC 5506, the brightest hard X-ray NLS1 // *Proc. of the Workshop Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies and Their Place in the Universe.*—2011.—ArXiv: 1105.5993.
27. *Soldi S., Ponti G., Beckmann V., Lubin'ski P.* AGN variability at hard X-rays // *The Extreme Sky: Sampling the Universe above 10 keV.*—2010.—ArXiv:1001.4348
28. *Wilson A. S., Colbert E. J. M.* The difference between radio-loud and radio-quiet active galaxies // *Astrophys. J.*—1995.—**438**, N 1.—P. 62—71.
29. *Yaqoob T.* The nature of the Compton-thick X-ray reprocessor in NGC 4945 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2012.—**423**, N 4.—P. 3360—3396.

Статья поступила в редакцию 06.11.15