

ПОИСК НЕТЕПЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СКОПЛЕНИИ ГАЛАКТИК ЗМЕЕНОСЕЦ

© 2023 г. Р. А. Кривонос^{1*}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 01.07.2022 г.

После доработки 31.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Представлены результаты исследования рентгеновского излучения от скопления галактик Змееносец по данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 20–120 кэВ. Целью работы является поиск нетепловой компоненты излучения от скопления. С использованием данных обсерватории ИНТЕГРАЛ за период наблюдений 2003–2009 гг. были построены изображения скопления галактик Змееносец в разных диапазонах энергии от 20 до 120 кэВ с извлечением спектральной информации. Показано, что в жестком рентгеновском диапазоне энергий источник является протяженным с угловым размером $4.9' \pm 0.1'$. В предположении фиксированной температуры межгалактического газа скопления 8.5 кэВ наблюдается наличие степенной компоненты возможного нетеплового излучения на уровне значимости 5.5σ , поток от которой согласуется с предыдущими работами. Однако ввиду неопределенности ограничения тепловой компоненты излучения в рентгеновском спектре на энергиях выше 20 кэВ, мы не можем утверждать о значимом детектировании нетеплового излучения от скопления. Опираясь на факт уверенного детектирования скопления до 70 кэВ, мы можем сделать вывод только о возможном наличии нетеплового избытка на энергиях выше 60 кэВ.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, скопления галактик, нетепловое излучение, скопление Змееносец.

DOI: 10.31857/S0320010823010047, **EDN:** PKMLKM

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство галактик находится в гравитационно-связанных системах — группах и скоплениях галактик, которые могут включать в себя от нескольких до нескольких тысяч галактик. В скоплениях галактик сами галактики занимают лишь 1% от полной массы, которая в основном определяется темной материей (90%) и горячим газом (9%) с температурой 10^7 – 10^8 К. Благодаря тормозному излучению плазмы, скопления галактик являются яркими источниками рентгеновского излучения.

Массивные скопления обычно образуются путем слияния меньших, вследствие чего возникают ударные волны, нагревающие межгалактический газ. Согласно теоретическим моделям, в ходе таких слияний в результате ускорения Ферми первого и второго рода рождаются релятивистские электроны, излучающие в рентгеновском (Миниати, 2003) и видимом диапазонах (Ямазаки, Лоэб, 2015) посредством обратного комптоновского рассеяния, а также в радиодиапазоне посредством синхротронного механизма (Брунетти, Вазза, 2020). Су-

ществуют также и другие модели, которые объясняют происхождение нетеплового излучения в радио- и рентгеновском диапазонах аннигиляцией частиц темной материи (Марчегани, Колафранческо, 2016).

Скопление галактик Змееносец является одним из самых ярких в рентгеновском диапазоне энергий. Рентгеновское излучение от него было впервые обнаружено в начале 80-х годов Джонстоном и др. (1980, 1981) по данным прибора А-2 обсерватории НЕАО-1. Это позволило измерить температуру горячего газа: $kT = 8 \pm 2$ кэВ, и оценить угловой размер скопления: $R_{\text{Oph}} = 3.9^{+1.2}_{-1.4}$ угл. мин (интервал значимости 90%). Также по сдвигу спектральных линий поглощения было измерено красное смещение $z = 0.028 \pm 0.003$. Независимо от них Вакамацу и Малкан (1981) обнаружили скопление Змееносец в оптическом диапазоне длин волн по изображениям на фотопластинках телескопа Шмидта Паломарской обсерватории. Они построили график зависимости плотности галактик в скоплении $\rho(r)$ от расстояния r то центра скопления и получили, что $\rho(r) \sim (1 + r^2/r_c^2)^{-1}$, где радиус ядра $r_c = 9.5' \pm 1.5'$. Также они показали,

*Электронный адрес: krivonos@cosmos.ru

что скопление Змееносец удаляется от Земли со скоростью $v \sim 7400$ км/с, и сделали вывод, что скопление находится приблизительно на таком же расстоянии от нас, как и скопление Волосы Вероники (Soma cluster). Отсюда для красного смещения получается значение $z \sim 0.025$, что согласуется с результатом Джонстона и др. (1981).

Арнауд и др. (1987) по данным обсерватории EXOSAT оценили температуру плазмы в скоплении на уровне $kT = 9.4^{+1.5}_{-1.2}$ и обилие железа — $0.26^{+0.14}_{-0.13}$ солнечных единиц (интервал значимости 90%). Мацузава и др. (1996) аппроксимировали рентгеновское излучение скопления моделью теплового тормозного излучения с двумя линиями железа $K\alpha$ и $K\beta$. По данным газового спектрометра GIS спутника ASCA они получили следующие значения параметров излучения: $z = 0.031^{+0.004}_{-0.007}$, $kT = 9.7 \pm 0.4$ кэВ, энергии линий железа $K\alpha$ и $K\beta$ — 6.60 ± 0.04 кэВ и 7.8 ± 0.2 кэВ соответственно, обилие железа — 0.24 солнечных единиц. Для аппроксимации распределения плотности газа в скоплении была выбрана β -модель:

$$n(r) = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta/2}, \quad (1)$$

где n_0 — плотность газа в центре скопления, r — расстояние от центра скопления. Были получены следующие параметры модели: $r_c = 3.8'$, $\beta = 0.62$.

Исследование возможного вклада нетеплового излучения в рентгеновский спектр скопления Змееносец (как и других скоплений) сильно осложнено неопределенностью измерения тепловой компоненты излучения горячего газа, который имеет многотемпературную структуру и содержит центральное течение охлаждения. Ввиду относительно высокой температуры скопления, измерения на энергиях выше 10 кэВ являются критически важными для ограничения параметров модели теплового излучения газа скопления.

Невалайнен и др. (2004) заявили об обнаружении нетеплового излучения от скопления Змееносец по данным обсерватории ВерроSAX на уровне значимости 2σ . Полученная ими температура плазмы в скоплении составляет $kT = 9.1^{+0.6}_{-0.5}$ кэВ. Уникальную возможность получить широкополосный рентгеновский спектр скопления Змееносец дает гамма-обсерватория ИНТЕГРАЛ. Экерт и др. (2008) зафиксировали по данным приборов JEM-X и IBIS/ISGRI этой обсерватории нетепловое излучение от скопления со значимостью 4–6 σ . При этом было показано, что скопление уверенно детектируется на энергиях выше 20 кэВ. В дополнение к этому исследованию Невалайнен и др. (2009)

расширили спектральное покрытие до энергий ниже 10 кэВ с помощью данных обсерватории ХММ-Newton и провели детальный пространственный анализ теплового излучения скопления.

Целью настоящей работы является продолжение поиска нетеплового излучения от скопления Змееносец и ограничение его параметров с помощью данных обсерватории ИНТЕГРАЛ в широком диапазоне энергий от 20 до 120 кэВ. В ходе многолетней работы на орбите характеристики приборов обсерватории ИНТЕГРАЛ постепенно деградировали, особенно после 2009 г. А именно, с 2009 по 2012 г. энергетическое разрешение детектора ISGRI ухудшилось с 5 до 15 кэВ, а нижняя граница энергетического диапазона повысилась с 17 до 23 кэВ (Кабальеро и др., 2013). Об ухудшении состояния детектора ИНТЕГРАЛ свидетельствует наблюдаемое падение скорости счета от “стандартной свечи” рентгеновской астрономии: Крабовидной Туманности на $\sim 20\%$ в период с 2009 по 2010 г. (см. рис. 6 в работе Неронова и др., 2021). Это сильно усложняет построение среднего рентгеновского спектра за длительный промежуток времени. Поэтому в данной работе мы используем наиболее качественные данные телескопа IBIS, полученные до 2009 г. При этом по сравнению с работой Экерта и др. (2008) мы используем не только больший объем данных (в исследование Экерта были включены данные наблюдений до 2007 г.), но и более современные энергетические калибровки и методы подавления систематического шума на изображениях телескопа IBIS (Кривонос и др., 2010).

2. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Гамма-обсерватория ИНТЕГРАЛ (INTEGRAL — INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) предназначена для изучения космических объектов в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах (Винклер и др., 2003). Обсерватория является совместным проектом Европейского космического агентства (ЕКА), Роскосмоса и НАСА. Она была выведена на высокоэллиптическую геостационарную орбиту в 2002 г. с использованием ракеты-носителя “Протон”.

В данной работе используются данные с телескопа IBIS с рабочим диапазоном энергий 15 кэВ–10 МэВ и угловым разрешением $12'$ в поле зрения $28^\circ \times 28^\circ$. Телескоп содержит два слоя детекторов: верхний, ISGRI, состоящий из CdTe-элементов размером $4 \times 4 \times 2$ мм, чувствительных на энергиях до 1 МэВ (Лебран и др., 2003), и нижний, PICsIT, состоящий из CsI-элементов размером $9 \times 9 \times 30$ мм, работающих в диапазоне выше 150 кэВ.

Телескоп IBIS работает по принципу кодирующей апертуры. Излучение от разных источников,

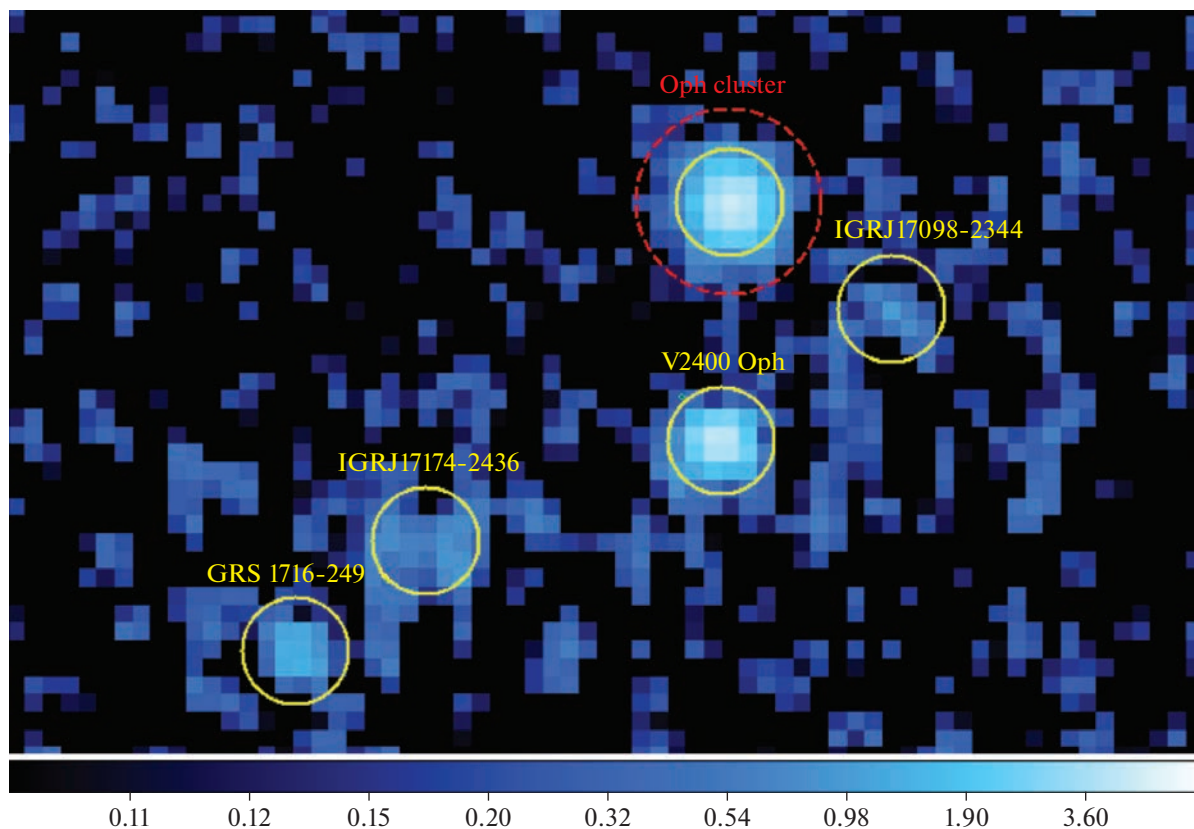


Рис. 1. Изображение области скопления галактик Змееносец в диапазоне 20–60 кэВ (в единицах мКраб) по данным телескопа IBIS. Желтыми кружками обозначены положения известных рентгеновских источников в поле зрения, размер кружков соответствует угловому разрешению телескопа (12'). Красной пунктирной окружностью показана область в 20', которая использовалась для построения радиального профиля скопления. Размер элемента изображения составляет 4'.

проходя сквозь маску, расположенную на некоторой высоте от детектора, создает на нем суперпозицию теней (тенеграмму). Изображение неба восстанавливается с помощью кросс-корреляции тенеграммы с функцией пропускания маски, в результате чего получается изображение области наблюдения на небесной сфере.

Данные телескопа IBIS анализировались с помощью программного обеспечения, разработанного в ИКИ РАН (см. Кривонос и др., 2010, 2012, 2017; Чуразов и др., 2014). Были построены изображения области скопления в нескольких интервалах с 20 до 120 кэВ по данным с 2003 по 2009 г. Используемый набор данных включает 7367 индивидуальных наблюдений центральной части Галактики с угловым смещением не больше 15 градусов от положения скопления. Общая экспозиция составляет 18 Мс (или 13 Мс с учетом мертвого времени). Мы используем энергетические калибровки программного обеспечения обсерватории ИНТЕГРАЛ Offline Scientific Analysis (OSA) версии 10.2.

2.1. Угловой размер скопления

Известно, что рентгеновское излучение скопления галактик Змееносец является протяженным, с характерным размером около 15 угл. мин (Невалайнен и др., 2009; Вернер и др., 2013), что сравнимо с угловым разрешением телескопа IBIS (12 угл. мин). Несмотря на то что телескопы с кодирующей апертурой не способны строить изображения протяженных объектов, некоторую информацию об их угловом размере все же можно получить по данным телескопа IBIS (Кузнецова и др., 2019). Кроме того, для корректного извлечения потока от протяженного объекта требуется применять специальные методы, отличные от тех, которые используются для точечных источников. В частности, для правильной оценки потока от рентгеновского источника при восстановлении его изображения функция свертки должна максимально совпадать с профилем этого источника для данного телескопа.

Чтобы определить, является ли скопление Змееносец точечным или протяженным источником для телескопа IBIS, мы исследуем радиальный профиль потока скопления. На рис. 1 показана карта

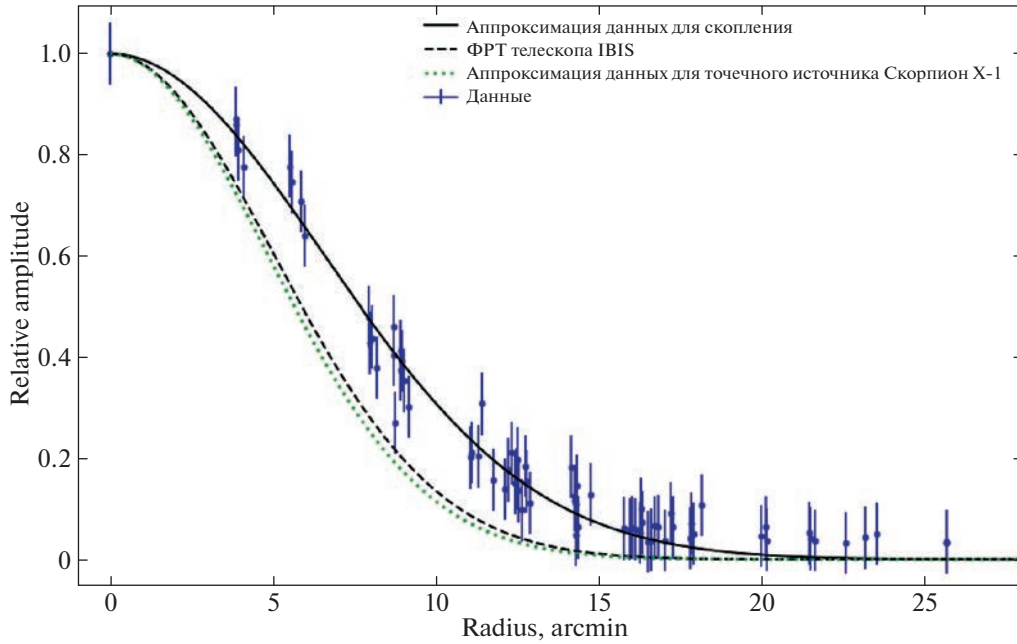


Рис. 2. Радиальный профиль яркости скопления Змееносец в диапазоне 20–60 кэВ, полученный по данным прибора ISGRI (синие точки). Черной штриховой линией показана ФРТ телескопа IBIS, зеленой пунктирной линией — аппроксимация радиального профиля точечного источника Скорпион X-1. Сплошная черная линия показывает результирующий профиль от ФРТ телескопа и профиля излучения скопления. Чтобы избежать слипания точек на рисунке, был добавлен искусственный разброс их горизонтальных координат на уровне $\pm 0.3'$.

потока от скопления Змееносец и ближайших к нему источников рентгеновского излучения в диапазоне энергий 20–60 кэВ. Для построения радиального профиля учитывались пиксели, лежащие внутри круга с радиусом $20'$. На таком расстоянии от центра скопления интенсивность спадает практически до нуля, как это видно из радиального профиля на рис. 2.

Хотя профиль рентгеновской яркости скопления описывается β -моделью, для проверки протяженности излучения нам достаточно аппроксимировать зависимость потока излучения от расстояния гауссианой:

$$I(r) \sim \exp\left(-\ln(2)\frac{r^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

где r — расстояние от центра скопления, R — полуширина на полувысоте для функции $I(r)$. Таким образом находим, что $R = 7.7' \pm 0.1'$ ($\chi^2/\text{d.o.f} = 37.7/75 = 0.50$). Значение R соответствует суперпозиции функции рассеяния точки (ФРТ) телескопа IBIS и радиального профиля источника: $R^2 = R_{\text{IBIS}}^2 + R_{\text{Oph}}^2$. Отсюда, зная полуширину ФРТ телескопа IBIS ($R_{\text{IBIS}} = 5.9'$), можно оценить полуширину профиля источника: $R_{\text{Oph}} = 4.9' \pm 0.1'$.

Произведя аналогичные действия для точечного рентгеновского источника Скорпион X-1, получаем $R_{\text{Sco X-1}} = 5.7' \pm 0.1'$, что соответствует полуширине ФРТ телескопа IBIS: $R_{\text{IBIS}} = 5.9'$ (см. рис. 2). Поэтому данный источник можно считать точечным.

Сравнивая полуширину радиальных профилей яркости скопления Змееносец и точечного источника, делаем вывод, что скопление является протяженным источником жесткого рентгеновского излучения. В дальнейшем рентгеновский поток скопления будет извлекаться из карт, свернутых с функцией Гаусса с $R = 7.7'$, если не оговорено иначе.

2.2. Модель излучения от скопления

Модель излучения представляет собой сумму теплового и нетеплового излучения. Для теплового излучения используется модель АРЕС (см., например, Ибараки и др., 2014). Данная модель аппроксимирует спектр излучения столкновительно-ионизованного газа. Ее определяют четыре параметра: температура плазмы kT (кэВ), красное смещение z , нормировка $\text{norm}_{\text{ares}}$ (cm^{-5}) и обилие металлов abundance в солнечных единицах. Нетепловая компонента излучения аппроксимируется степенной моделью powerlaw . Она включает

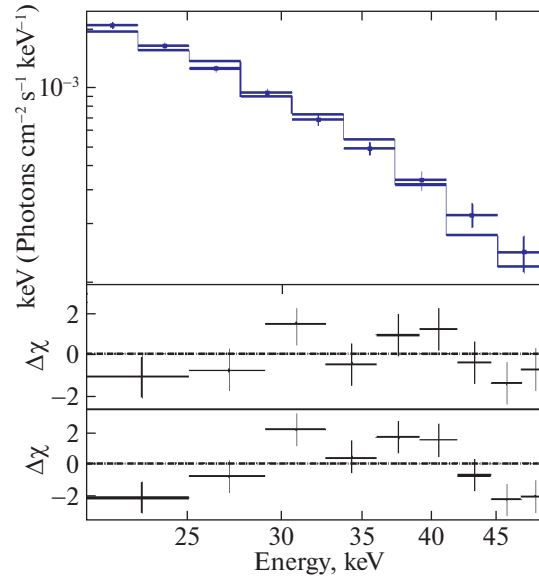


Рис. 3. Вверху: энергетический спектр излучения от скопления Змееносец по данным телескопа IBIS в диапазоне энергий 20–50 кэВ с ошибками (синие бины) и тепловая модель APEC спектра (синяя линия). Внизу: невязки $\{\Delta\chi = (\text{data} - \text{model})/\text{error}\}$ тепловой (APEC; сверху) и степенной (powerlaw; снизу) моделей спектра.

в себя следующие параметры: показатель степени α и нормировку norm_{pow} на энергии 1 кэВ (фотоны/кэВ/см²/с).

Итак, всего имеется 6 неизвестных параметров. Из статьи Экерта и др. (2008) фиксируются 4 из них: наклон степенной модели $\alpha = 2$, обилие — 0.49 солнечных единиц, температура $kT = 8.5$ кэВ и красное смещение $z = 0.028$. Эти значения согласуются с другими работами¹ (см., например, Мацузава и др., 1996; Невалайнен и др. 2004). Два оставшихся неизвестных параметра — нормировки обеих компонент излучения norm_{pow} и $\text{norm}_{\text{apec}}$ — будем аппроксимировать из условия минимума статистики χ^2 .

2.3. Оценка параметров модели излучения

В качестве значений потоков излучения от скопления и соответствующих ошибок для каждого из диапазонов энергий берутся значения в центре скопления свернутых карт потоков и их ошибок.

В результате статистика принимает минимальное значение, равное $\chi^2/\text{d.o.f.} = 1.9$ (d.o.f. соответствует количеству степеней свободы, degree of freedom), если положить следующие значения

¹ Тем не менее мы должны отметить, что предположение о фиксированной температуре скопления является сильным допущением. Известно, что в центральной области скопления присутствует смесь фаз газа с температурами от 1 до 11 кэВ (Вернер и др., 2016).

оцениваемых параметров: $\text{norm}_{\text{pow}} = (3.9 \pm 0.7) \times 10^{-3}$ фотоны/кэВ/см²/с, $\text{norm}_{\text{apec}} = 0.28 \pm 0.01$ см⁻⁵. Для построения доверительных интервалов обеих нормировок фиксировался один из этих параметров, а второй варьировался так, чтобы статистика изменилась на $\delta\chi^2 = 1$. Полученные значения хорошо согласуются с предыдущими работами. Наша модель дает значение потока нетеплового излучения $(6.6 \pm 1.2) \times 10^{-12}$ эрг/см²/с в диапазоне энергий 20–60 кэВ. Экерт и др. (2008) получили значение потока в диапазоне энергий 20–60 кэВ, равное $(8.2 \pm 1.3) \times 10^{-12}$ эрг/см²/с, что согласуется с полученным нами значением в пределах ошибок.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы проверить, насколько хорошо спектр на энергиях ниже 50 кэВ описывается тепловым законом, сначала он был аппроксимирован степенной функцией (рис. 3). Наблюдается кривизна невязок, что свидетельствует о тепловом характере спектра. Действительно, если теперь смоделировать спектр тепловой моделью APEC (рис. 3), у которой свободными параметрами являются температура и нормировка, а остальные два параметра такие же, как в подразделе 2.3, то уменьшенная статистика хи-квадрат (reduced chi-squared) уменьшится по сравнению с предыдущим случаем с 3.65 до 1.28.

Если теперь добавить в рассмотрение остальные бины с энергиями выше 50 кэВ (рис. 4, слева),

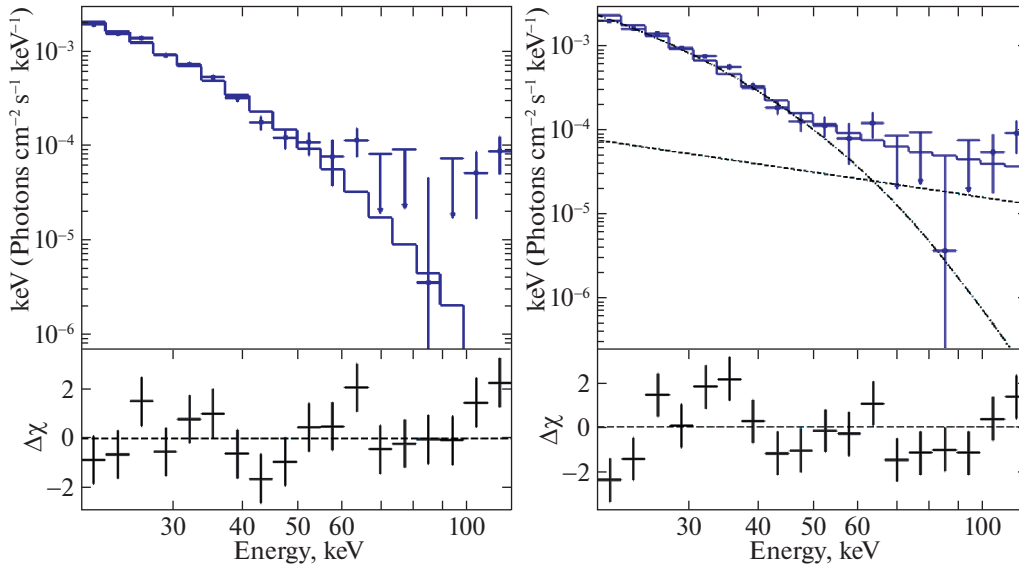


Рис. 4. Энергетический спектр излучения от скопления Змееносец по данным телескопа IBIS в диапазоне энергий 20–120 кэВ. Вверху слева: спектр аппроксимирован тепловой моделью АРЕС с температурой 11.3 кэВ (синяя гистограмма). Вверху справа: спектр аппроксимирован суммой (синяя гистограмма) тепловой модели АРЕС с температурой 10.8 кэВ (штрихпунктирная линия) и нетепловой модели powerlaw (штриховая линия). Внизу: невязки обеих моделей.

то невязки практически не изменяются. Температура определяется на уровне ≈ 11.3 кэВ. Затем добавим в модель нетепловую компоненту, подчиняющуюся степенному закону (рис. 4, справа). Статистика становится равной 1.37. При попытке построить доверительный интервал для нормировки нетепловой компоненты norm_{pow} удастся получить лишь верхний предел на нее, который оказывается равен 2.3×10^{-3} фотоны/кэВ/см²/с.

Затем положим температуру $T = 8.5$ кэВ, как было сделано в статье Экерта и др. (2008). Доверительный интервал в 1σ для нормировки norm_{pow} в этом случае оказывается равным $(3.2\text{--}4.6) \times 10^{-3}$, что дает значимость детектирования нетеплового сигнала, равную 5.5σ . Статистика становится равной $\chi^2/\text{d.o.f.} = 1.9$. Вклады тепловой и нетепловой компонент излучения в диапазоне энергий 20–60 кэВ при данной температуре соотносятся как 4 : 1 соответственно. Их суммарный поток в этом диапазоне энергий составляет $(3.7 \pm 0.25) \times 10^{-11}$ эрг/см²/с. Величина потока нетеплового излучения в этом диапазоне составляет $(6.6 \pm 1.2) \times 10^{-12}$ эрг/см²/с. Поток нетеплового излучения на энергиях 50–70 кэВ составляет 5.4% от суммарного потока излучения в диапазоне 20–70 кэВ.

Также наблюдается корреляция между температурой тепловой компоненты и нормировкой нетепловой компоненты: при повышении температуры от 8.5 кэВ до ее оптимального значения

$T \approx 10.8$ кэВ нормировка norm_{pow} падает с $(3.9 \pm 0.7) \times 10^{-3}$ см⁻⁵ до $1.3^{+0.9}_{-1.3} \times 10^{-3}$ см⁻³. Более детально корреляция представлена на рис. 5. Таким образом, из-за значительной неопределенности в параметрах тепловой компоненты излучения в рентгеновском спектре невозможно с уверенностью говорить о значимом детектировании нетеплового излучения от скопления. Мы можем утверждать только о возможном наличии нетеплового избытка на энергиях выше 60 кэВ.

Карты значимости скопления в четырех интервалах с 20 до 70 кэВ представлены на рис. 6. В диапазоне энергий 50–70 кэВ скопление наблюдается со значимостью 4.3σ , т.е. можно говорить о значимом детектировании скопления на энергиях до 70 кэВ.

4. ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ

В данной статье представлены результаты наблюдений скопления галактик Змееносец обсерваторией ИНТЕГРАЛ с помощью телескопа IBIS в широкой полосе энергий 20–120 кэВ на основе данных наблюдений с 2003 по 2009 г. Показано, что в жестком рентгеновском диапазоне источник является протяженным.

Продemonстрировано наличие нетеплового излучения, избыточного по отношению к тепловому с фиксированной температурой 8.5 кэВ, на уровне значимости 5.5σ . В таком случае нормировка степенной модели нетеплового излучения оказывается

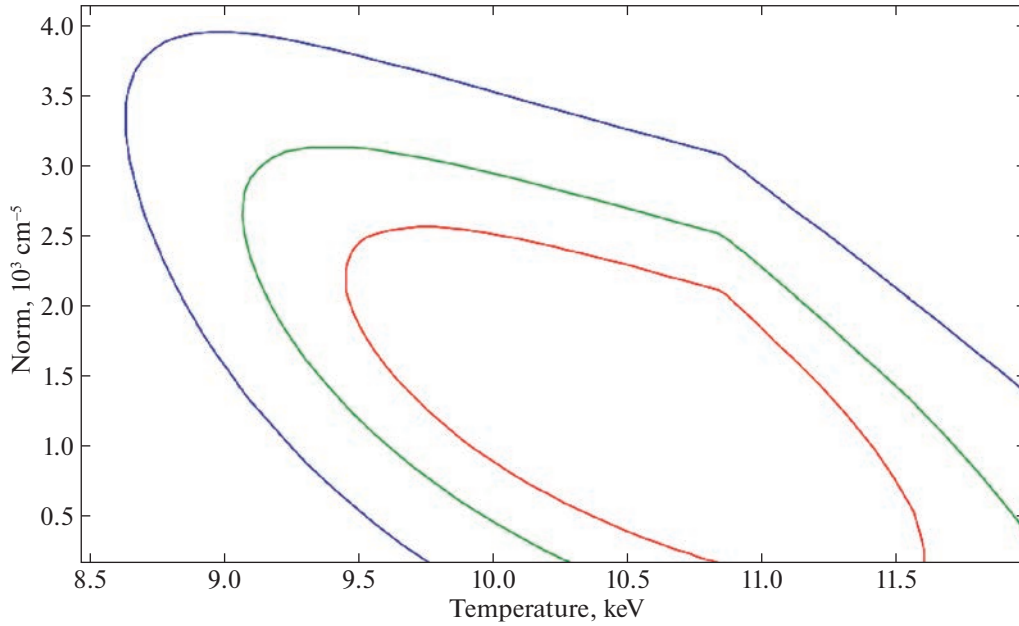


Рис. 5. Двумерные доверительные контуры погрешности в 1σ , 2σ и 3σ (при двух свободных параметрах) для нормировки нетепловой компоненты и температуры тепловой компоненты в диапазоне энергий 20–120 кэВ.

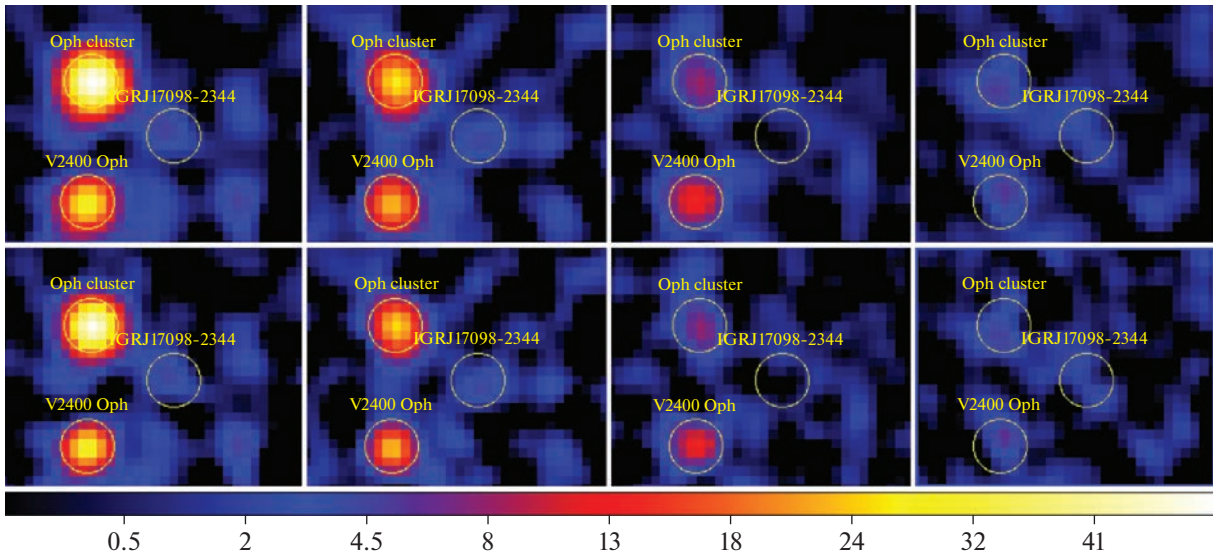


Рис. 6. Карты значимости сигнала от скопления Змееносец и ближайших к нему источников. В каждом из двух рядов представлено 4 диапазона энергий слева направо: 20–30, 30–40, 40–50 и 50–70 кэВ соответственно. Вверху: карты получены сверткой карт потоков и их ошибок с гауссианой $R = 7.7'$ (см. подраздел 2.1). Внизу: Аналогично верхнему ряду карт, но для гауссианы с $R = 5.9'$, что соответствует точечному источнику.

равной $(6.6 \pm 1.2) \times 10^{-12}$ эрг/см²/с в диапазоне энергий 20–60 кэВ, что согласуется с результатом Экерта и др. (2008) в пределах ошибок (см. подраздел 2.2). Однако из-за неопределенности параметров тепловой компоненты излучения в

рентгеновском спектре на энергиях выше 20 кэВ невозможно сделать утверждение о значимом детектировании нетеплового излучения от скопления. Опираясь на факт уверенного детектирования скопления до 70 кэВ, мы можем сделать лишь

вывод о возможном наличии нетеплового избытка на энергиях выше 60 кэВ. Для уверенного ответа на этот вопрос необходимо улучшить качество наблюдений на энергиях выше 60 кэВ, что можно сделать, используя весь массив наблюдательных данных обсерватории ИНТЕГРАЛ. Мы планируем это сделать в будущей работе.

С другой стороны, требуется дополнить спектральное покрытие жесткого диапазона измерениями ниже 10 кэВ данными с телескопов, обладающих достаточным пространственным разрешением для более сильного ограничения многотемпературной тепловой модели скопления, например, как это было сделано в работе Невалайнен и др. (2009). Это позволит избежать использования предположения о фиксированной температуре скопления. Согласно работе Вернера и др. (2016), в скоплении Змееносец наблюдается горячий газ с температурой до 11 кэВ. Излучение газа с такой температурой будет доминировать на энергиях выше 20 кэВ, что и наблюдается в настоящей работе: аппроксимация рентгеновского спектра со свободной температурой дает оценку около 11 кэВ (см. раздел 3).

Однако добавление рентгеновских данных ниже 10 кэВ к спектру телескопа IBIS сопряжено с определенными трудностями. Большинство рентгеновских телескопов имеют малые поля зрения, что не позволяет сделать однородное исследование всего скопления. Это приведет к тому, что многотемпературное тепловое излучение будет измерено только в определенной части скопления, в то время как телескоп с кодирующей апертурой IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ измеряет излучение от скопления хотя и целиком, но с неопределенным регионом извлечения сигнала, которое определяется только угловым разрешением телескопа 12'. Более-менее однозначное соответствие измеренной смеси пространственных разнотемпературных компонент скопления обсерваторией ИНТЕГРАЛ можно ожидать при использовании данных телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории Спектр-РГ, которое обеспечивает полный охват скопления и имеет достаточно широкий рабочий энергетический диапазон 4–30 кэВ.

Автор выражает благодарность С.Ю. Сазонову, А.А. Вихлину и Е.М. Чуразову за рекомендации по улучшению статьи. Работа основана на наблюдениях с помощью гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ, проекта ЕКА с инструментами и центром научных данных, финансируемого государствами-членами ЕКА (особенно странами PI: Данией, Францией, Германией, Италией, Швейцарией, Испанией) и Польшей, и с участием России и США.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №19-12-00396.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арnaud и др. (K. Arnaud, R. Johnstone, A. Fabian, C.S. Crawford, P.E.J. Nulsen, R.A. Shafer, and R.F. Mushotzky), *MNRAS* **227**, 241 (1987).
2. Брунетти, Вазза (G. Brunetti and F. Vazza), *Phys. Rev. Lett.* **124**, 1101 (2020).
3. Вакамацу, Малкан (K. Wakamatsu and M.A. Malkan), *Publ. Astron. Soc. Japan* **33**, 57 (1981).
4. Вернер и др. (N. Werner, I. Zhuravleva, R.E.A. Canning, S.W. Allen, A.L. King, J.S. Sanders, A. Simionescu, G.B. Taylor, R.G. Morris, and A.C. Fabian), *MNRAS* **460**, 2752 (2016).
5. Винклер и др. (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Gimenez, S. Grebenev, W. Hermsen, J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
6. Гинзбург, Сыроватский (V.L. Ginzburg and S.I. Syrovatskii), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **3**, 297 (1965).
7. Джонстон и др. (M. Johnston, R. Doxsey, F. Marshall, and D.A. Schwartz), *Bull. Am. Astron. Soc.* **12**, 487 (1980).
8. Джонстон и др. (M. Johnston, H. Bradt, R. Doxsey, B. Margon, F.E. Marshall, and D.A. Schwartz), *Astrophys. J.* **245**, 799 (1981).
9. Ибараки и др. (Y. Ibaraki, N. Ota, H. Akamatsu, Y.-Y. Zhang, and A. Finoguenov), *Astron. Astrophys.* **562**, 7 (2014).
10. Кабальеро и др. (I. Caballero, J.A. Zurita Heras, F. Mattana, et al.), in *Proceedings of Science (INTEGRAL 2012)*, Eds. A. Goldwurm, F. Lebrun and C. Winkler, (<http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=176>), eprint arXiv:1304.1349 **142** (2013).
11. Кривонос и др. (R. Krivonos, M. Revnivtsev, S. Tsygankov, S. Sazonov, A. Vikhlinin, M. Pavlinsky, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **519**, 11 (2010).
12. Кривонос и др. (R. Krivonos, S. Tsygankov, A. Lutovinov, M. Revnivtsev, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **545**, 7 (2012).
13. Кривонос и др. (R. Krivonos, S. Tsygankov, I. Mereminskiy, A.A. Lutovinov, S.Yu. Sazonov, and R.A. Sunyaev), *MNRAS* **470**, 512 (2017).
14. Кузнецова и др. (E. Kuznetsova, P. Krivonos, E. Churazov, N. Lyskova, and A. Lutovinov), *MNRAS* **489**, 2 (2019).

15. Лебран и др. (F. Lebrun, J.P. Leray, P. Lavocat, J. Cretolle, M. Arques, C. Blondel, C. Bonnin, A. Bouere, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L141 (2003).
16. Марчегани, Колафранческо (P. Marchegiani and S. Colafrancesco), *JCAP* **11**, 033 (2016).
17. Мацузава и др. (H. Matsuzawa, M. Matsuoka, Y. Ikebe, T. Mihara, and K. Yamashita), *Publ. Astron. Soc. Japan* **48**, 565 (1996).
18. Миниати (F. Miniati), *MNRAS* **342**, 1009 (2003).
19. Невалайнен и др. (J. Nevalainen, T. Oosterbroek, M. Bonamente, and S. Colafrancesco), *Astrophys. J.* **608**, 166 (2004).
20. Невалайнен и др. (J. Nevalainen, D. Eckert, J. Kaastra, M. Bonamente, and K. Kettula), *Astron. Astrophys.* **508**, 1161 (2009).
21. Неронов и др. (A. Neronov, V. Savchenko, A. Tramacere, M. Meharga, C. Ferrigno, and S. Paltani), *Astron. Astrophys.* **651**, A97 (2021).
22. Окумура и др. (Y. Okumura, H. Tsunemi, K. Yamashita, M. Matsuoka, K. Koyama, S. Hayakawa, K. Masai, and J.P. Hughes), *Publ. Astron. Soc. Japan* **40**, 639 (1988).
23. Чуразов и др. (E. Churazov, R. Sunyaev, J. Isern, J. Knodlseder, P. Jean, F. Lebrun, N. Chugai, S. Grebenev, E. Bravo, S. Sazonov, and M. Renaud), *Nature* **512**, 406 (2014).
24. Экерт и др. (D. Eckert, N. Produit, S. Paltani, A. Neronov, and T.J.-J. Courvoisier), *Astron. Astrophys.* **479**, 27 (2008).
25. Ямазаки, Лоэб (R. Yamazaki and A. Loeb), *MNRAS* **453**, 1990 (2015).