

850 ИСТОЧНИКОВ СРГ/ЕРОЗИТЫ В ПЛЕЯДАХ

© 2024 г. И. М. Хамитов^{1*}, И. Ф. Бикмаев¹, М. Р. Гильфанов^{2,3}, Р. А. Сюняев^{2,3}, П. С. Медведев²¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия³Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.

После доработки 03.03.2025 г.; принята к публикации 04.03.2025 г.

Используя данные рентгеновского обзора неба телескопом еРОЗИТА орбитальной обсерватории СРГ и оптический каталог из 2209 членов рассеянного звездного скопления Плеяд, построенный на основе данных GAIA, мы нашли 850 рентгеновских источников ассоциированных со звездами скопления. Более 650 из них впервые обнаружены в рентгеновских лучах. На расстоянии Плеяд, номинальная чувствительность еРОЗИТЫ в этой области неба соответствует светимости $L_X \sim 1.6 \times 10^{28}$ эрг/с в диапазоне 0.3–2.3 кэВ. Источники еРОЗИТЫ, ассоциированные с Плеядами, излучают с суммарной светимостью $L_{X,\text{total}} \sim 1.3 \times 10^{32}$ эрг/с, в миллион раз превышающей рентгеновскую светимость спокойного Солнца. Для 27 источников была зарегистрирована сильная, более чем в 10 раз, рентгеновская переменность. Большинство из них известны как эруптивные оптические переменные звезды dM-класса. Величина $R_X = \log(L_X/L_{\text{bol}})$ для звезд Плеяд растет с уменьшением эффективной температуры звезды от $R_X \approx -5$ до $R_X \approx -2$. Распределение звезд по R_X носит бимодальный характер. Левый пик на $R_X \sim -4.3$ образован звездами FGK-классов, а правый пик на $R_X \sim -3.1$ в основном населен звездами M-класса. Характер зависимости величины R_X от числа Россби R_o различен для разных спектральных классов. При малых числах Россби для звезд K- и M-классов $R_X \sim -3$ и слабо зависит от R_o . При $R_o \geq 0.25$ наблюдается быстрое падение R_X для K-звезд, в то время как M-звезд с большими числами Россби в нашей выборке нет. Большинство звезд F- и G-классов лежат в области меньших значений $R_X \sim -4.5$, однако размера нашей выборки недостаточно для более подробной характеристики зависимости R_X-R_o для них.

Ключевые слова: рентгеновские источники; звезды; рассеянные звездные скопления: Плеяды; инструменты: СРГ/еРОЗИТА, ROSAT/SPSPC.

DOI: 10.31857/S0320010824120054, EDN: LFFXHE

ВВЕДЕНИЕ

Рассеянное звездное скопление Плеяды насчитывает 2226 членов (по данным GAIA DR3, Жерял и др., 2023) возрастом порядка 120–130 млн лет и находящиеся на среднем расстоянии 135 пк. Достаточно подробный обзор по исследованию возраста и расстояния до скопления приведены в Лодье и др. (2019). Большинство членов скопления составляют звезды M-класса с общей массой порядка $800 M_\odot$. Плеяды, по-видимому, являются одной из наиболее хорошо изученных космических экосистем. Ввиду своей близости и относительно высокой яркости членов скопления (часть из них видна даже невооруженным глазом), Плеяды с инструментальной точки зрения являются удобной мишенью для наблюдений. С научной точки зрения, звезды Плеяд, близкие по возрасту и химсоставу, представляют собой замечательную эволюционную лабораторию как для изучения распределения физических характеристик звезд на ранней стадии эволюции, так и для задач формирования и обитаемости планет. Это объясняет неослабевающий ин-

терес к ним исследователей и научных миссий в широком диапазоне электро-магнитного излучения.

Обнаружение обсерваторией Einstein рентгеновской эмиссии у звезд различных спектральных классов, причем с широким диапазоном уровня светимостей внутри одного класса, открыло направление изучения звезд с рентгеном (Вайана и др., 1981). Область Плеяд стала одной из основных мишеней в такого рода исследованиях. Практически все рентгеновские обсерватории – Einstein (Джаккони и др., 1979), ROSAT (Трюмпер и др., 1991; Пфефферман и др., 1986), Chandra (Вейсскопф и др., 2002) и XMM-Newton (Янсен и др., 2001) проводили длительные наблюдения области Плеяд. В зависимости от глубины, чувствительности и площади покрытия полей получены сведения о рентгеновских источниках Плеяд, но в основном в малой области ядра скопления. Так, обсерватория Einstein провела 14 наведений на область Плеяд в период с 13 августа 1979 г. по 8 февраля 1981 г. Длительность наведений варьировалась с 1.3 до 14.2 кс (Мичела и др., 1985, 1990). При раз- мере площадок $1^\circ \times 1^\circ$ центральная область скопления размером $2^\circ \times 2^\circ$ была покрыта наблюдени-

*Электронный адрес: irek_khamitov@hotmail.com

ями более одного раза. Всего обсерватория Einstein обнаружила 85 рентгеновских источников Плеяд, 20 из которых пришлось на центральную область. Обсерватория ROSAT, проводила наблюдения как в режиме обзора всего неба (Шмитт и др., 1993), так и в режиме длительных точечных наведений (Стауффер и др., 1994; Мичела и др., 1996). Обсерватория ROSAT провела обзор всего неба между 30 июлем 1990 г. и 25 январем 1991 г. В обзоре, для обеспечения одинаковой чувствительности и возможности сравнения с данными обсерватории Einstein, поиски рентгеновских источников в Плеядах были ограничены областью ядра скопления размером $2^\circ \times 2^\circ$. В итоге было найдено 24 рентгеновских источника. В режиме длительных точечных наведений обсерваторией ROSAT наблюдались три области скопления Плеяд: центральное, северо-восточное и северо-западное. Каждая область, с полем зрения радиусом $\sim 1^\circ$, экспонировалась обсерваторией ROSAT приблизительно по 31, 20 и 26 кс соответственно. Для исследования переменности звезд с рентгеном центральное поле наблюдалось трижды: в феврале и августе 1991 г. и в августе 1992 г. Оставшиеся две области с небольшим перекрытием с центральным полем в сентябре 1991 г. Была отождествлена 171 звезда скопления Плеяд, причем в центральном поле было найдено 99 источников. Что же касается наблюдений обсерватории Chandra, то область ядра скопления Плеяд наблюдалась дважды по 38.4 и 23.6 кс соответственно, 18 сентября 1999 г. и 20 марта 2000 г. (Кришнамурти и др., 2001; Даниель и др., 2002). В поле размером $17' \times 17'$ среди 99 рентгеновских источников были отождествлены 23 звезды, принадлежащие Плеядам. Длительные мониторинговые наблюдения восьми избранных звезд Плеяд также проводились обсерваторией XMM-Newton. Первые наблюдения были выполнены 1 сентября 2000 г. длительностью ~ 40 кс (Бриггс, Пай, 2003). А в феврале 2015 г. с целью изучения вспышечной активности звезд как в рентгеновском, так и в оптических диапазонах, наблюдались 12 известных звезд Плеяд одновременно с оптическими наблюдениями космической обсерватории Kepler (Гуарчелло и др., 2019).

Область неба вокруг Плеяд вошла в пять обзоров неба (с относительно равномерным временным покрытием по полю), полученных с помощью рентгеновского телескопа еРОЗИТА (Предель и др., 2021) на борту орбитальной обсерватории СРГ (Сюняев и др., 2021). В настоящей работе мы представляем наиболее полный к настоящему времени каталог 850 рентгеновских источника, ассоциированных со звездами Плеяд. Отождествление было проведено на основе данных еРОЗИТЫ и оптического каталога членов скопления Плеяд (Жерял и др., 2023). Каталог рентгеновских источников вместе с архивными данными предыдущих миссий, наряду с эволюционными и популяционными задачами, позволяет изучать вспышечную активность звезд скопления на масштабах до 30–40 лет.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ В ПЛЕЯДАХ

Данные телескопа еРОЗИТА

Область Плеяд наблюдалась обсерваторией СРГ с относительно равномерным временным покрытием по полю с экспозицией ~ 750 с. В результате, в диапазоне энергий 0.3–2.3 кэВ была достигнута чувствительность по потоку $F_{X,0.3-2.3} \sim 7.4 \times 10^{-15}$ эрг/с/см². На рис. 1 показано рентгеновское изображение в псевдоцветах области Плеяд размером $6^\circ \times 6^\circ$. RGB-изображение составлено по данным еРОЗИТЫ в трех энергетических диапазонах: от 300 до 600 эВ (красный цвет), от 600 эВ до 1.0 кэВ (зеленый цвет) и от 1 до 2.3 кэВ (синий цвет). Для отождествления рентгеновских источников в Плеядах использовался рентгеновский каталог точечных источников еРОЗИТЫ, составленный по сумме пяти обзоров неба в диапазоне 0.3–2.3 кэВ. Рентгеновские потоки, приведенные в каталоге еРОЗИТЫ, были пересчитаны для модели теплового излучения оптически тонкой плазмы с температурой 150 эВ в предположении нулевой колонки нейтрального водорода на луче зрения, $NH = 0$, для того же диапазона 0.3–2.3 кэВ. Для температуры 300 (500) эВ, приведенные светимости следует умножить на коэффициент 0.83 (0.81). Умеренные значения колонковой плотности, $NH \sim 10^{20}$ см⁻² изменяют эти значения на несколько процентов. Мы не пытались применить болометрическую коррекцию рентгеновских светимостей в силу ее большой неопределенности. Каталог был отфильтрован по порогу достоверности детектирования, соответствующего 4 σ (порог по величине правдоподобия ≥ 10). Кроме того, было использовано ограничение по размеру круга 98% ошибки локализации рентгеновского источника (r_{98}). Для дальнейшего анализа использовались источники еРОЗИТЫ, удовлетворяющие условию $r_{98} < 20''$.

Отождествление оптических компонентов

В качестве опорного каталога для идентификации рентгеновских источников еРОЗИТЫ в Плеядах был использован наиболее полный и обширный к настоящему времени каталог членов ближайших рассеянных скоплений в том числе и Плеяд, представленный в работе Жерял и др. (2023). Отбор членов скоплений в данном каталоге основан на исключительной астрометрии каталогов GAIA DR3 в пяти, либо в полном шестимерном пространствах пространственных и кинематических параметров. Далее будем называть его "6d-каталогом". Различие между отбором в пятимерном или шестимерном пространстве пространственных и кинематических параметров связано с наличием или отсутствием данных о лучевых скоростях звезд. В пределах приливного радиуса скопления ($r_{\text{tidal}} = 11.28 \pm 0.03$ пк), было отождествлено 1355, так называемых действительных члена. В целом в 6d-каталоге

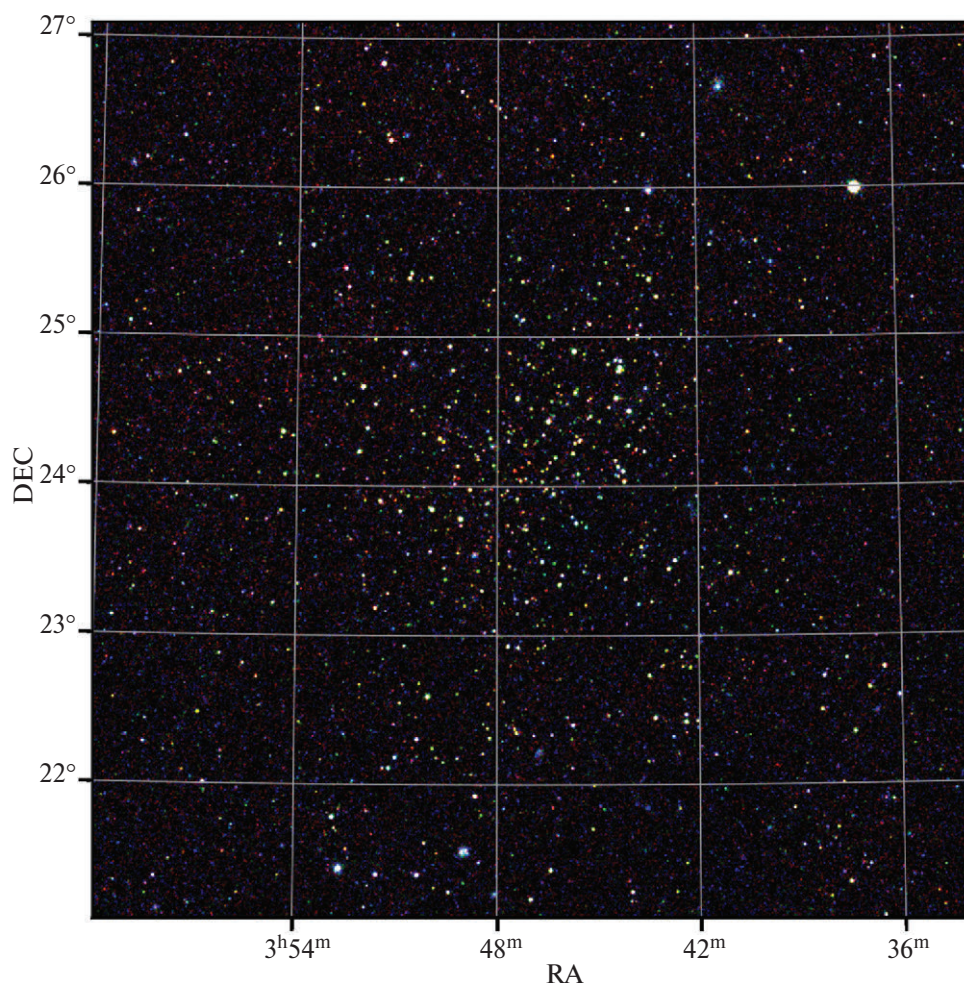


Рис. 1. Рентгеновское изображение области рассеянного звездного скопления Плеяды размером $6^\circ \times 6^\circ$, составленное по данным рентгеновского телескопа eROZITA космической обсерватории СРГ. При построении RGB-изображения использовались следующие энергетические диапазоны: от 300 до 600 эВ в красном цвете, от 600 эВ до 1.0 кэВ в зеленом цвете и от 1 до 2.3 кэВ в синем цвете.

Плеяд представлены члены, находящиеся на расстоянии от центра скопления до трех приливных радиусов, общим числом 2226. Однако из 6d-каталога были исключены все звезды с $G < 5^m$. Данное ограничение обусловлено инструментальными особенностями системы регистрации eРОЗИТЫ, связанными с утечками в ультрафиолетовой части спектра. Кроме того, поскольку российский консорциум eРОЗИТЫ отвечает за обработку данных на восточной Галактической полусфере, рассматривались только звезды Плеяд в данной области неба. В итоге, для дальнейшего анализа из 6d-каталога использовалось 2209 звезд. Отметим, что это ограничение затрагивает лишь периферийную часть Плеяд, содержащую около $\sim 1\%$ звезд скопления, и не касается области внутри приливного радиуса, исследованию которой посвящена большая часть настоящей статьи.

Каталог рентгеновских источников eРОЗИТЫ был скоррелирован с 6d-каталогом Плеяд, при этом для поиска совпадений использовался радиус r_{98} . Всего было найдено 850 рентгеновских источников

eРОЗИТЫ, в круге ошибок которых содержится хотя бы одна звезда Плеяд, причем для 38 источников в круге ошибок было найдено две звезды Плеяд.

КАТАЛОГ ЯРКИХ В РЕНТГЕНЕ ЗВЕЗД В ПЛЕЯДАХ ПО ДАННЫМ ЕРОЗИТЫ

Часть каталога из 850 рентгеновских источников eРОЗИТЫ, ассоциированных со звездами в Плеядах, представлена в табл. 1. Полностью каталог будет представлен в электронном виде в Центре астрономических данных в Страсбурге.

Болометрическая светимость и спектральные классы были оценены интерполяцией зависимости данных параметров от абсолютной звездной величины (MG) в полосе G (GAIA DR3) для звезд главной последовательности. Для этого использовалась версия таблиц Мамажека (Version 2022.04.16), первоначально опубликованная в Пеко и Мамажек (2013). Таким же образом была получена оценка эффективной температуры (T_{eff}) и массы в единицах масс Солнца M/M_\odot .

Таблица 1. Рентгеновские источники еРОЗИТЫ, ассоциированные со звездами в Плеядах

SRGe+	Gaia DR3+	RA (°)	DEC (°)	G (mag)	r98 (")	sep (")	N	L_X	L_{X_err}	$\log \frac{L_X}{L_{bol}}$ (dex)	X_{var}	$S pT$
J025845.9+212815	108606322618018432	44.6915	21.4702	9.3	3.0	2.1	1	9.25	0.82	−4.01	1.5	F7V
J030319.1+314527	135368508653824768	45.8281	31.7582	15.0	8.6	5.1	1	0.60	0.14	−3.16	>1.8	M2.5V
J030417.5+190747	59777943236934528	46.0721	19.1281	15.7	10.8	6.3	1	0.51	0.16	−3.15	>1.3	M3V
J030426.4+331703	136166066901394048	46.1100	33.2838	16.5	6.3	0.9	2	0.85	0.18	−2.64	>9.1	M3.5V
J030649.7+174135	34825351478452352	46.7092	17.6929	16.5	8.6	7.2	1	0.46	0.14	−2.91	>1.0	M3.5V
J030801.4+291427	122767864881453568	47.0055	29.2418	16.1	6.3	4.1	1	0.57	0.12	−2.82	>2.0	M3.5V
J030805.2+284213	121962197736025216	47.0235	28.7039	14.6	5.6	5.8	1	1.21	0.17	−2.93	>7.2	M2.5V
J030936.2+245422	111721552594418304	47.4008	24.9065	12.1	4.6	1.3	2	2.46	0.26	−3.48	10.5	K5V

Примечание. Полная таблица доступна в архиве Центра астрономических данных в Страсбурге. Столбцы имеют следующие обозначения: 1) идентификационный номер в каталоге СРГ/еРОЗИТА; 2)–5) идентификационный номер, прямое восхождение и склонение в градусах (J2000.0), звездная величина в полосе G согласно Gaia DR3; 6) $r98$ – радиус 98% круга позиционных ошибок источников еРОЗИТЫ в угл. сек; 7) расстояние между рентгеновским и оптическим положениями источника в угл. сек; 8) N – число оптических источников Gaia DR3 внутри $r98$; 9) оценка рентгеновской светимости источника по данным пяти обзоров еРОЗИТЫ в диапазоне 0.3–2.3 кэВ в единицах $\times 10^{29}$ эрг/с; 10) ошибка на рентгеновскую светимость источника в единицах $\times 10^{29}$ эрг/с; 11) логарифм отношения рентгеновской светимости L_X по данным пяти обзоров еРОЗИТА в диапазоне 0.3–2.3 кэВ к болометрической светимости L_{bol} звезды; 12) X_{var} – фактор рентгеновской переменности, определенный как отношение между максимальным и минимальным значениями потока, зарегистрированного в пяти обзорах еРОЗИТЫ с учетом ошибки измерения потока; 13) $S pT$ – спектральный класс звезды.

При определении L_{bol} , $S pT$, T_{eff} и M/M_\odot не учитывалась двойственность объектов. Согласно Торрес и др. (2021), в нашем каталоге отождествлено небольшое число, всего 35, спектрально-двойных объектов. Однако реальное число двойных звезд в Плеядах должно быть значительно больше. В частности, предположение об одиночности звезд может приводить к некорректным решениям Gaia для двойных звезд и затруднять их классификацию как членов скопления. В целом отметим, что для систем с q близким к 1 параметр R_X будет искажаться не сильно (рентгеновская светимость увеличится приблизительно так же, как и болометрическая светимость такой системы). Напротив, системы с малыми значениями q при сравнимых абсолютных значениях рентгеновских светимостей звезд ранних и поздних спектральных классов (рис. 6) могут привести к недооценке параметра R_X – приблизительно пропорционально отношению болометрических светимостей компонент двойной системы. На диаграмме цвет–светимость в предельном случае спектрально-двойных систем с $q \sim 1$, регистрируемая абсолютная звездная величина (MG) будет смещена на 0.75 звездной величины. На рис. 2 чуть выше главной последовательности хорошо видна немногочисленная группа таких фотометрических двойных систем.

В табл. 1 рентгеновские источники, в пределах $r98$ которых имеется более одной звезды Плеяд, отмечены символом (*) в идентификационном номере источников еРОЗИТЫ. Угловое разрешение телескопов еРОЗИТЫ недостаточно для однозначной идентификации этих рентгеновских источников.

Фактор рентгеновской переменности X_{var} был определен как отношение между максимальным и

минимальными потоками, зарегистрированными в ходе пяти обзоров неба. Потоки в индивидуальных обзорах измерялись методом принудительной PSF-фотометрии. Для этого распределение отсчетов на рентгеновском изображении аппроксимировалось функцией отклика на точечный источник телескопа с учетом карты фона. Аппроксимация производилась методом максимального правдоподобия с учетом Пуассоновского распределения отсчетов, а положение источника было зафиксировано на положении, определенном по сумме данных всех пяти обзоров, таким образом, единственным параметром аппроксимации был поток от источника. При выборе максимального и минимального значения потока, в тех обзорах, в которых источник был зарегистрирован со значением правдоподобия не менее 6 (что соответствует уровню достоверности $\approx 3\sigma$ для Гауссова распределения), использовалось измеренное значение потока. В случае, если в обзоре достоверность детектирования источника не достигала 6, при определении минимального потока использовался 3σ верхний предел на поток в этом обзоре, а в определении максимального потока это измерение не участвовало. В случае, если ни в одном из обзоров неба источник не детектировался с правдоподобием >6 , то значение X_{var} для этого источника считалось неопределенным.

СВОЙСТВА ЗВЕЗД С РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВНУТРИ ПРИЛИВНОГО РАДИУСА СКОПЛЕНИЯ ПЛЕЯД

Для исследования свойств звезд с рентгеном в Плеядах мы ограничились областью внутри приливного радиуса (11.2 пк). Всего из 6d-каталога в дан-

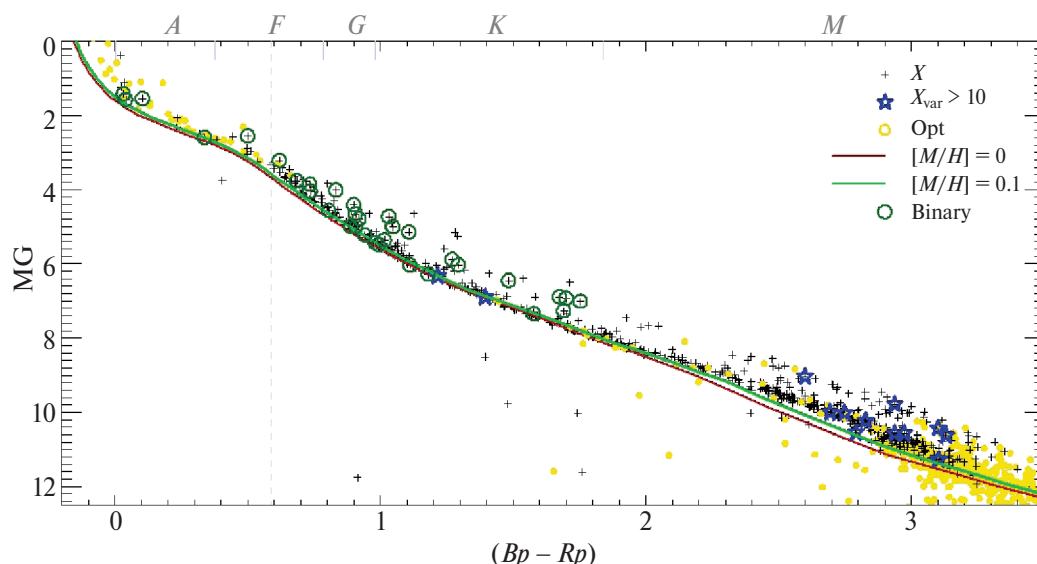


Рис. 2. Зависимость цвет ($Bp - Rp$) — абсолютная звездная величина (MG) источников Плеяд внутри приливного радиуса. Черными крестиками показаны звезды с рентгеном, регистрируемые eРОЗИТА, а желтые кружочки — звезды с уровнем рентгена ниже чувствительности eРОЗИТА. Зелеными кружочками отмечены источники с рентгеном, у которых обнаружена двойственность по спектральным наблюдениям (Торрес и др., 2021). Красной и зеленой линиями показаны изохроны, рассчитанные по ресурсу *PARSEC v1.2S* (Брессан и др., 2012), с фиксированным звездным возрастом в 125 млн лет и металличностью: $[M/H] = 0.0$ (солнечная) и $[M/H] = 0.1$ соответственно. Вертикальным пунктиром показана условная граница звезд Главной Последовательности с наличием конвективной зоны. Синими звездочками отмечены рентгеновский источники, показывающие сильную переменность $X_{\text{var}} > 10$.

ную выборку попадает 1349 звезд. Число источников eРОЗИТА, ассоциированных со звездами Плеяд, равно 688, т.е. eРОЗИТА детектирует рентгеновское излучение более чем от половины звезд внутри приливного радиуса Плеяд.

Диаграмма цвет—светимость

Диаграмма цвет—светимость для звезд внутри приливного радиуса Плеяд показан на рис. 2. На ней звезды с рентгеновским излучением показаны черными крестиками, а звезды не детектируемые eРОЗИТА желтыми кружочками. Зелеными кружочками отмечены источники с рентгеном, у которых обнаружена двойственность по спектральным наблюдениям (Торрес и др., 2021). Также синими символами показаны звезды с показателем рентгеновской переменности $X_{\text{var}} > 10$, т.е. те источники, которые показывают переменность рентгеновского потока более чем на порядок. Примечательно, что основная доля сильно-переменных рентгеновских источников относится к карликам М-класса.

На рис. 2 красной линией показана изохрона, рассчитанная по ресурсу *PARSEC v1.2S* (Брессан и др., 2012), с фиксированным звездным возрастом в 125 млн лет и солнечной металличностью. Металличность звезд в Плеядах была определена по 10 членам скопления на основе спектроскопии с высоким спектральным разрешением и фотометрическими методами (Нетопил и др., 2016, и ссылки в ней). Полученные оценки $[M/H]_{\text{sp}} = -0.01 \pm 0.05 \text{ dex}$ и $[M/H]_{\text{phot}} = -0.04 \pm 0.11 \text{ dex}$ близки к солнечной металличности.

На рис. 2 наблюдается систематическое смещение звезд класса М, составляющих главную последовательность (ГП), от данной модельной изохроны. Такое поведение справедливо как для источников с рентгеном, так и звезд Плеяд с уровнем рентгеновского излучения ниже предела чувствительности eРОЗИТА. Расхождение чуть меньше для изохроны с металличностью $[M/H] = 0.1$ (зеленая линия на рис. 2). Это смещение может быть связано с недостатками использованной модельной изохроны или более сложными эффектами (см., например, Белл и др., 2012), однако исследование его причин выходит за рамки данного исследования.

На рис. 2 также хорошо видна группа источников, расположенных выше наблюдаемой ГП, так называемых фотометрических двойных систем. Помимо двойственности систем, наличие пятен у активных звезд может привести к покраснению регистрируемых цветов и в меньшей степени повлиять на интегральный поток в видимой области. Расчеты, выполненные для солнечной металличности, показывают, что цвета быстрых ротаторов хорошо описываются моделями с высокой запятненностью поверхности у звезд позднего спектрального класса Плеяд. Напротив, медленно вращающиеся источники описываются изохронами без пятен (Сомерс и др., 2020).

Звезды с рентгеновским излучением обнаруживаются во всех спектральных диапазонах — от раннего А-класса и до поздних М-карликов (М5V), однако их относительная доля возрастает позднее класса F5, с которого начинается условная граница нали-

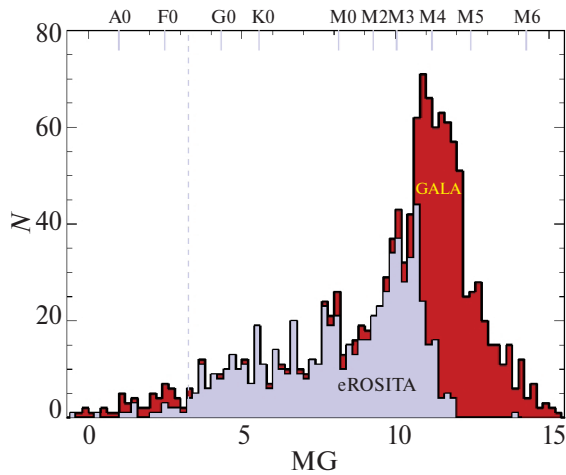


Рис. 3. Распределение числа звезд по абсолютной звездной величине (MG). Выборка звезд Плеяд внутри приливного радиуса скопления (11.2 пк). Красным цветом показано распределение по всей выборке из 6d-каталога (GAIA), серым — звезды с рентгеном по данным eРОЗИТЫ. Вертикальным пунктиром отмечена условная граница звезд с наличием конвективной зоны.

чия конвективной зоны. На рис. 2 эта граница показана вертикальной пунктирной линией. Отсутствие звезд с рентгеном на правом конце главной последовательности, среди звезд слабее 11 абсолютной звездной величины, объясняется пределом чувствительности eРОЗИТЫ.

Распределение звезд с рентгеновским излучением в Плеядах по спектральным классам

Распределение звезд внутри приливного радиуса Плеяд по спектральным классам показано на рис. 3. На рисунке приведены распределения всех звезд и звезд с рентгеном. Гистограммы построены по абсолютной звездной величине с бинированием по $0.^m75$. Как и на рис. 2, вертикальной штриховой линией показана условная граница звезд ГП с наличием конвективной зоны.

На рис. 4 показана зависимость от спектрального класса доли звезд с рентгеновским излучением. Ошибки в каждом бине вычислялись в предположении биномиального распределения числа рентгеновских источников¹. Результаты подсчетов доли звезд с рентгеном в широких интервалах по спектральным классам приведены в табл. 2.

С точки зрения наличия детектируемого рентгеновского излучения, на рис. 3 и 4 можно выделить три интервала спектральных классов: 1) звезды ранее класса F5, 2) звезды класса F5-M3 и 3) звез-

¹Если N_{gaia} — полное число источников в бине, из которых от N_{ero} зарегистрировано рентгеновское излучение, то $p = N_{\text{ero}}/N_{\text{gaia}}$ — оценка доли звезд с рентгеновским излучением в данном бине. Предполагая биномиальное распределение, ожидаемая дисперсия $\text{Var}(N_{\text{ero}}) = N_{\text{gaia}} * p * (1 - p) = N_{\text{ero}} * (1 - N_{\text{ero}}/N_{\text{gaia}})$. Следовательно, $\sigma = \sqrt{N_{\text{ero}} * (1 - N_{\text{ero}}/N_{\text{gaia}})}$.

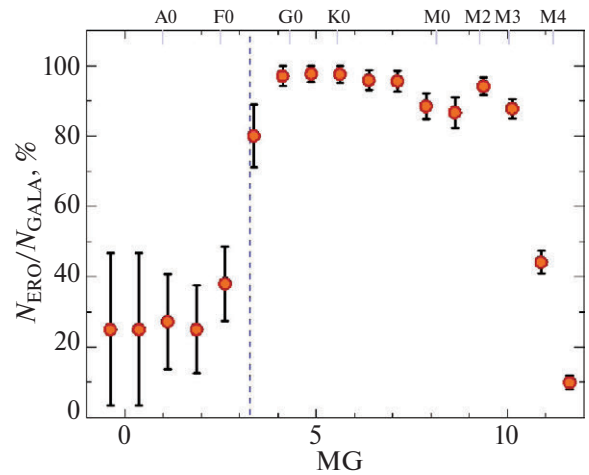


Рис. 4. Доля звезд с рентгеном внутри приливного радиуса Плеяд в зависимости от абсолютной звездной величины (MG). Вертикальной штриховой линией показана условная граница звезд с наличием конвективной зоны.

Таблица 2. Распределение доли звезд Плеяд с рентгеновским излучением по спектральным диапазонам в пределах приливного радиуса 11.2 пк

Спектральный диапазон	N_{opt} (GAIA)	N_X (eРОЗИТА)	N_X/N_{opt} (%)	σ (%)
Ранее F5	57	19	33.3	6.2
F5-G0	41	39	95.1	3.4
G0-K0	64	62	96.9	2.2
K0-M0	192	180	93.7	1.7
M0-M1	51	43	84.3	5.1
M1-M2	38	34	89.5	5.0
M2-M3	118	110	93.2	2.3
M3-M4	309	173	56.0	2.8
M4-M5	321	27	8.4	1.5
Позднее M5	158	1	0.6	0.6
Всего	1349	688	51.0	1.4

ды позднее класса M3. Первая группа характеризуется отсутствием у звезд конвективной зоны и низкой рентгеновской светимостью, несмотря на большую светимость в оптическом диапазоне. Соответственно, число звезд, детектируемых eРОЗИТА, невелико и ограничено чувствительностью рентгеновского обзора. Доля звезд с рентгеновским излучением составляет всего треть от общего числа звезд GAIA в данной группе. Учитывая, что рентгеновская светимость звезд A-класса (Дрейк и др., 2014; Понтер и др., 2022) значительно ниже уровня предельной светимости, достигнутой в обзоре eРОЗИТЫ на расстоянии Плеяд, регистрируемое рентгеновское излучение звезд этой группы обусловлено, по-видимому, вторичным компонентом в двойной системе. Второй интервал по спектральным классам демонстрирует высо-

кую долю звезд с рентгеновским излучением — выше ~ 80 – 90% . В третьем интервале спектральных классов падает абсолютное значение светимости звезд в оптическом и рентгеновском диапазонах, и число звезд, детектируемых eРОЗИТА ограничено чувствительностью рентгеновского обзора.

На рис. 4 обращает на себя внимание особенность в поведении доли звезд с рентгеном на спектральных классах M0–M3. Эта особенность может быть интерпретирована как провал на спектральных классах M0–M1 или как подъем в районе M2–M3. Статистическая значимость этой особенности в наших данных не превышает $\sim 2\sigma$, поэтому мы отложим ее более подробное обсуждение на последующие работы, если ее существование будет подтверждено с более высокой достоверностью.

Рентгеновская переменность

На рис. 5 показана зависимость параметра рентгеновской переменности X_{var} , введенного выше, от абсолютной звездной величины и пиковой рентгеновской светимости. Источники, у которых удастся определить лишь нижнюю границу параметра X_{var} , показаны в виде красных стрелок. Можно заметить, что позднее класса M2 отмечается рост рентгеновской переменности.

Для 27 источников Плеяд зарегистрирована переменность с $X_{\text{var}} \geq 10$, из них 13 расположены внутри приливного радиуса скопления. У трех сильно-переменных источников в круге ошибок r_{98} находится две звезды Плеяд, это SRGeJ034422.1+244606, SRGe034707.1+234252 и 034916.7+240059.

Как видно на рис. 5, почти все сильно-переменные объекты не детектировались в состоянии с минимальным потоком. Они относятся к холодным звездам

M-класса и известны как эруптивные оптические переменные звезды, а их сильная рентгеновская переменность связана в основном со звездными вспышками. Их изучению будет посвящена отдельная статья.

Также из рис. 5 (правая панель) видно, что для источников с пиковой рентгеновской светимостью ниже $\sim 10^{29}$ эрг/с есть только нижние пределы на фактор переменности X_{var} . Это связано с тем, что порог детектирования в отдельном скане примерно в 3 раза хуже, чем порог чувствительности по всем данным и может превышать $\sim 5 \times 10^{28}$ эрг/с. Из-за некоторой переменности и/или Пуассоновских вариаций, для источников слабее $\sim 10^{29}$ эрг/с хотя бы в одном обзоре неба источник не детектируется и в соответствии с определением X_{var} для таких источников мы получаем лишь нижний предел на эту величину.

Зависимость рентгеновской светимости звезд Плеяд от эффективной температуры

В распределении рентгеновской светимости звезд Плеяд в целом нет определенной зависимости от эффективной температуры звезд. Наблюдается широкий диапазон спектральных классов звезд от раннего (без конвективной зоны) до поздних M-классов (рис. 6). Максимальные значения рентгеновской светимости зарегистрированы у звезд солнечного типа $L_X \sim 2 \times 10^{30}$ эрг/с, что на два порядка выше предельной чувствительности eРОЗИТЫ на среднем расстоянии до Плеяд 135 пк. Также обращает на себя внимание, что у звезд G-класса ($5000 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 6000 \text{ K}$) источники с минимальной рентгеновской светимостью существенно превышают порог чувствительности eРОЗИТЫ.

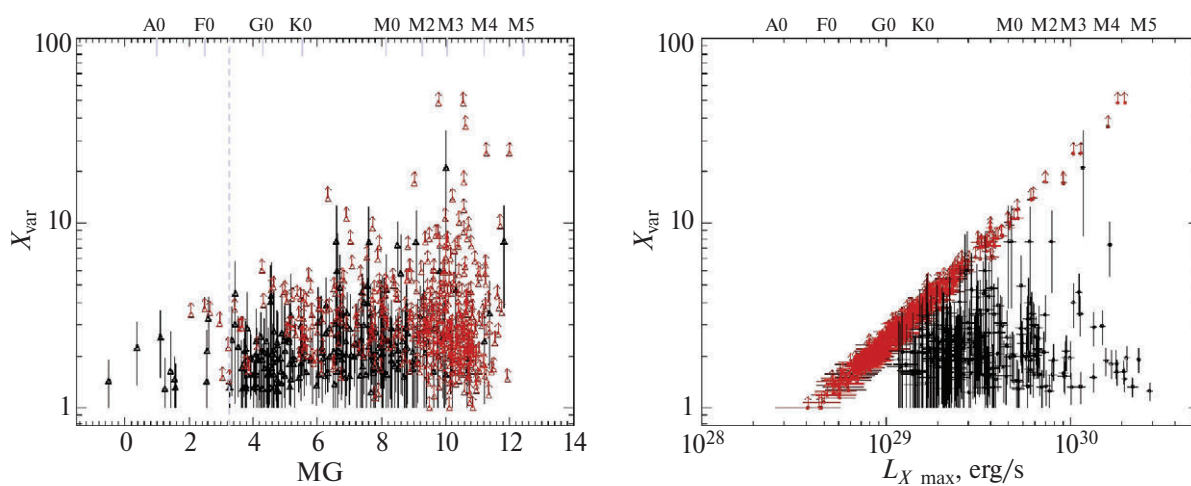


Рис. 5. Зависимость параметра рентгеновской переменности X_{var} от абсолютной звездной величины (левая панель) и пиковой рентгеновской светимости (правая панель). Красными стрелками показаны нижние пределы на X_{var} для источников, которые не детектируются в состоянии с минимальным потоком. Для таких источников нижний предел на X_{var} примерно пропорционален рентгеновскому потоку, как это видно из правого рисунка. На левом рисунке вертикальной штриховой линией отмечена условная граница звезд с наличием конвективной зоны.

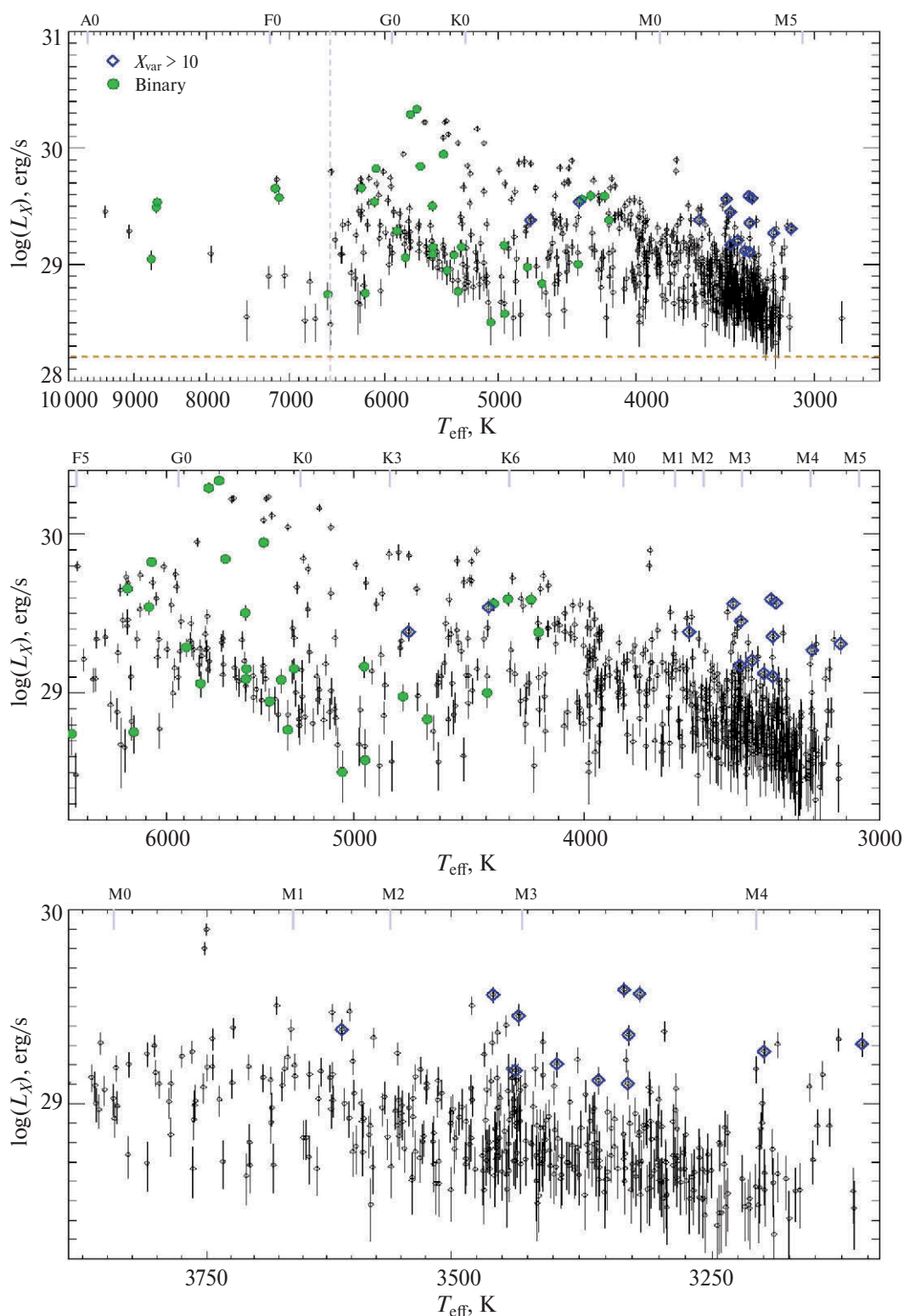


Рис. 6. Зависимость рентгеновской светимости звезд Плеяд в диапазоне 0.3–2.3 кэВ по сумме всех обзоров от эффективной температуры T_{eff} . Синими ромбами показаны сильнопеременные в рентгене звезды Плеяд. Зелеными символами отмечены источники, у которых обнаружена двойственность по спектральным наблюдениям (Торрес и др., 2021). Верхний рисунок – общий вид, красным горизонтальным пунктиром отмечен уровень чувствительности еРОЗИТЫ на среднем расстоянии Плеяд 135 пк. Средний рисунок – зависимость для звезд с наличием конвективной зоны. Нижний рисунок – область звезд поздних спектральных классов.

Отношение рентгеновской и болометрической
светимостей

Известно, что у звезд поздних спектральных классов солнечного типа конвекция вместе с вращением приводят к возникновению магнитного динамо в основании зоны конвекции. Результаты магнитного динамо проявляются в виде магнитных явлений в звездных фотосферах и над ними в виде магнитных пятен, магнитно-замкнутой корональной плазмы, в которой периодически происходят вспышки и так далее. Ожидается, что вследствие вращательно индуцированного внутреннего динамо уровень рентгеновской светимости коррелирует со скоростью вращения звезды. Однако на уровне так называемого канонического предела, $L_X/L_{\text{bol}} \approx 10^{-3}$ (Вилху, 1984; Райт и др., 2011; Фроинд и др., 2024), происходит насыщение и рентгеновская светимость перестает меняться с увеличением скорости вращения. Причина данного насыщения рентгеновской эмиссии до сих пор не выяснена. Это может быть проявлением физического насыщения механизма динамо, либо полным покрытием поверхности звезды активными регионами, дающими наибольший вклад в рентгеновское излучение (см., например, обзор Подель, Назе, 2009).

Распределение величины $R_X = \log(L_X/L_{\text{bol}})$ является бимодальным (рис. 7). Пик с меньшим значением R_X образован звездами FGK-классов, а второй пик в основном населен M-звездами. Подгонка гауссианами дает значения максимумов в районе -4.3 dex и -3.1 dex, с FWHM 0.2 dex и 0.3 dex соответственно.

Подобная бимодальность наблюдается и в других звездных скоплениях, в частности и в более старых, чем Плеяды, рассеянных скоплениях Гиady и Ясли

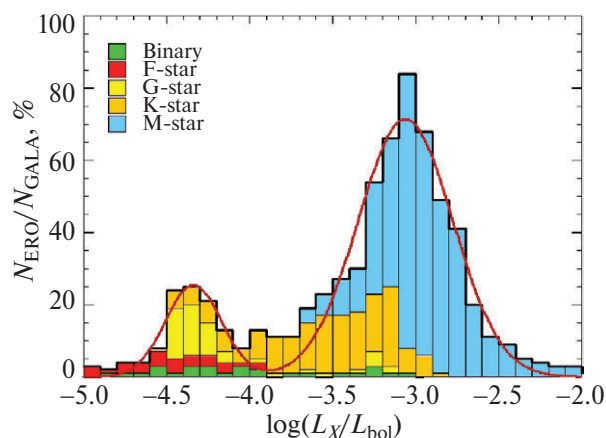


Рис. 7. Распределение $R_X = \log(L_X/L_{\text{bol}})$ звезд Плеяд с рентгеном по данным eROZITY. Красными линиями показаны подгонки двумя гауссианами. Пик с меньшим значением R_X образован звездами FGK-классов, второй пик населен в основном K- и M-звездами. Распределение показано в виде так называемой гистограммы с накоплением, где суммарное значение в данном бине по R_X определяется как сумма всех гистограмм различных цветов, дающих вклад в бин.

возрастом ~ 700 млн лет (Нуñez и др., 2022). Бимодальное распределение R_X с максимумами в районе -3.1 и -4.3 dex наблюдается и для звезд поля (Фроинд и др., 2024).

Некорректное определение R_X в спектрально-двойных системах может быть одним из объяснений наблюдаемой бимодальности. Оценка болометрической светимости относится к массивному компоненту, в то время как рентгеновское излучение производится в основном вторичным, менее массивным компонентом со значительной корональной активностью. Это может привести к появлению второго пика на меньших значениях R_X .

Также возможно, что наблюдаемая бимодальность имеет физическую природу. Интересно отметить, что если это так, то это различие в характеристиках корональной активности проявляется уже в первые 100 млн лет эволюции звезд главной последовательности.

Зависимость величины R_X от эффективной температуры звезды представлена на рис. 8. Из рисунка очевиден тренд роста R_X с уменьшением эффективной температуры звезды — отношение L_X/L_{bol} растет более чем на три порядка от звезд ранних спектральных классов к поздним спектральным классам. Примерно $\sim 27\%$ источников характеризуются значением $R_X \gtrsim -3$, и почти все они относятся к спектральному классу позднее M0. Почти все сильнопеременные в рентгене источники ($X_{\text{var}} \geq 10$), показанные на рис. 8 синим цветом, демонстрируют $R_X \gtrsim -3$.

Для построения зависимости R_X от периода вращения звезд (P) и более сильного показателя корональной активности — числа Россби² (Ro) использовался сводный каталог вращения звезд Плеяд (Годой-Ривера и др., 2021). Время циркуляции конвективной ячейки (τ), необходимое для оценки числа Россби ($Ro = P/\tau$), оценивалось на основе эмпирической зависимости от массы звезды (Райт и др., 2011). Это $\log - \log$ полином второго порядка:

$$\log(\tau) = 1.16 - 1.49 \log(M/M_{\odot}) - 0.54 \log^2(M/M_{\odot}). \quad (1)$$

Данная зависимость справедлива для диапазона масс звезд $0.09 < M/M_{\odot} < 1.36$, т.е. для звезд с конвективной зоной. В нашей выборке имеется небольшая группа источников с массами выше $M/M_{\odot} > 1.36$, но, поскольку у них отсутствует конвективная зона, τ теряет смысл и они не используются при построении зависимостей от числа Россби. Из рассмотрения также исключены источники с $X_{\text{var}} > 10$, так как рентгеновская светимость у данных источников может быть переоценена из-за наблюдений их во вспышках. Также были исключены источники, у которых в круге ошибок r_{98} имеется более одной звезды Плеяд из 6d-каталога.

На рис. 9 показаны полученные зависимости L_X/L_{bol} от периода вращения (левый рисунок) и числа

²https://en.wikipedia.org/wiki/Rossby_number

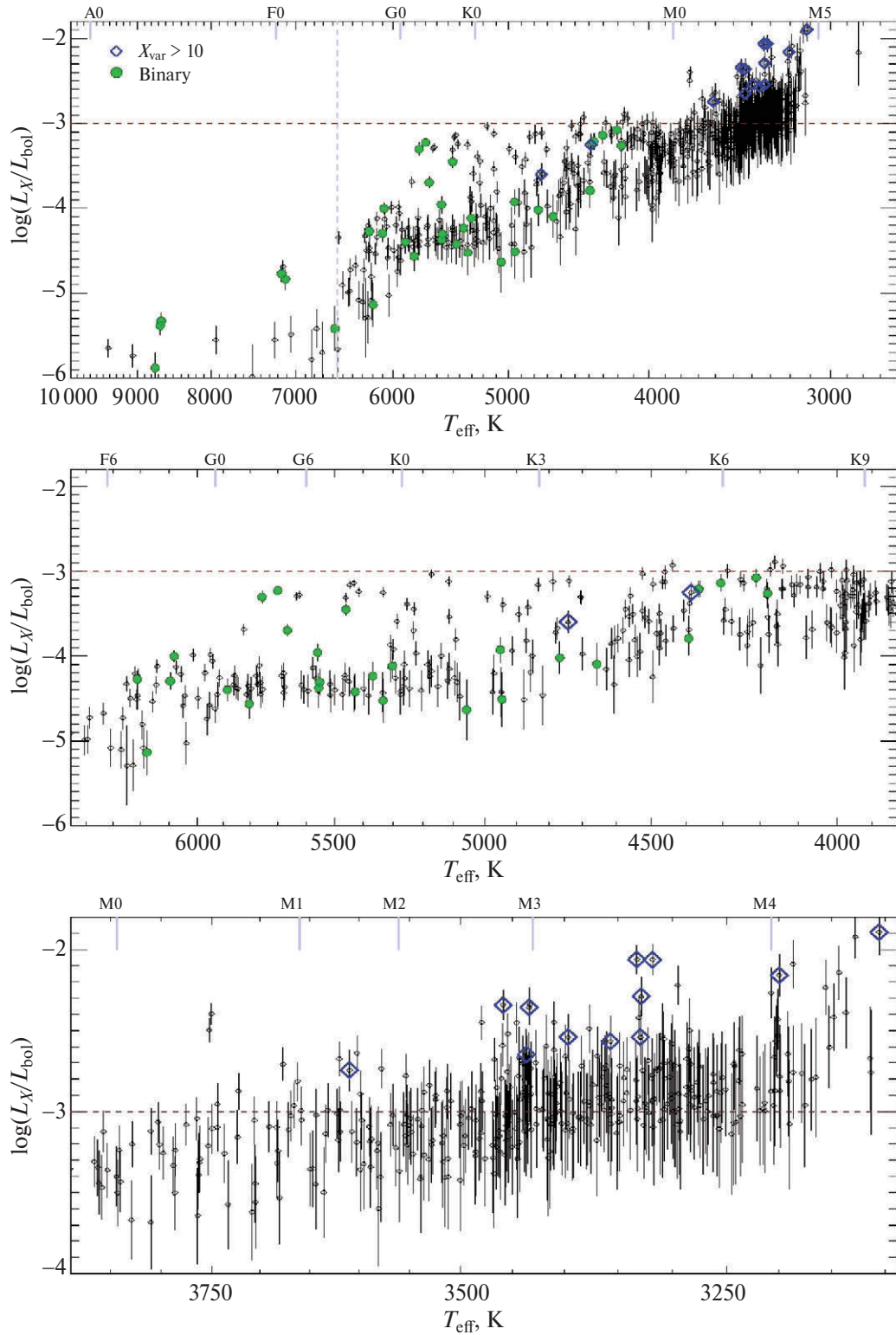


Рис. 8. Зависимость $\log(L_X/L_{bol})$ от эффективной температуры T_{eff} оптического компонента. Вертикальной пунктирной линией показана условная граница для звезд с наличием конвективной оболочки и ее отсутствием. Горизонтальный красный пунктир соответствует доле рентгеновской светимости в 10^{-3} от болометрической светимости. Синим цветом отмечены звезды с рентгеновской переменностью более 10. Зелеными символами отмечены источники, у которых обнаружена двойственность по спектральным наблюдениям (Торрес и др., 2021). Верхний график — общий вид; средний — для звезд F5-K9 классов; нижний — для звезд классов M0-M5.

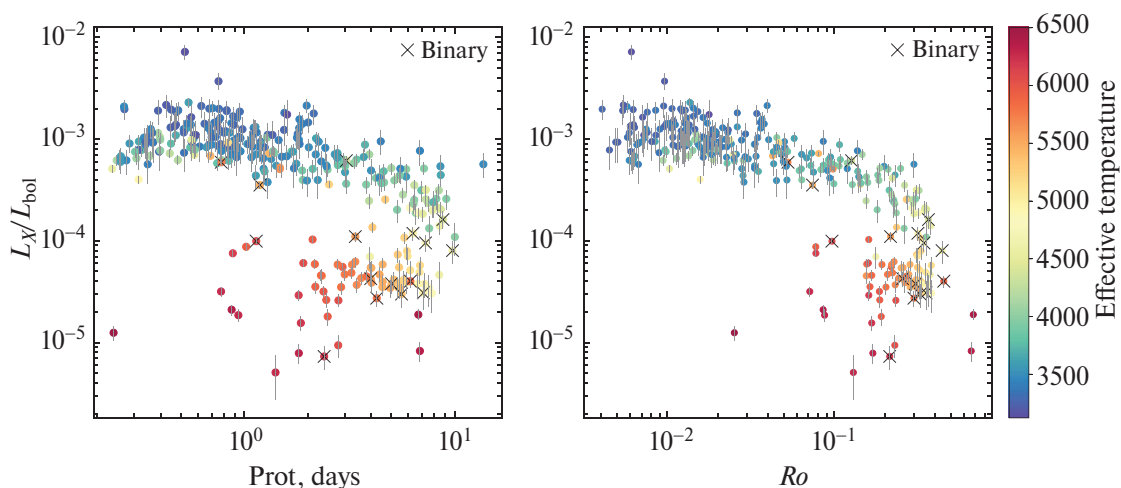


Рис. 9. Зависимости L_X/L_{bol} от периода вращения звезд Плеяд (из каталога Годой-Ривера и др., 2021) (левая панель) и от числа Россби (правая панель). Крестиками отмечены источники, у которых обнаружена двойственность по спектральным наблюдениям (Торрес и др., 2021).

Россби (правый рисунок). Подтвержденные двойные системы отмечены крестиками, а источники, у которых нет надежных свидетельств двойственности — разными цветами, характеризующими эффективную температуру звезды.

Один объект на рис. 9 — HD 23912, расположен сильно в стороне от остальных звезд (в нижнем левом углу на рисунке). Это звезда, у которой обнаружен пекулярный химический состав (Будер и др., 2021). Сильное отклонение от общего тренда наряду с пекулярным химическим составом, может свидетельствовать, в пользу двойственности этого источника с малым отношением масс компонент.

На рис. 10 показана зависимость R_X от числа Россби отдельно для спектральных классов F, G, K и M, для класса F рассматривались звезды поздние класса F5. В зависимости для K-звезд хорошо виден слом на значении числа Россби $Ro \sim 0.2\text{--}0.3$, выше которого зависимость заметно укручается. Такое поведение можно качественно проинтерпретировать как переход от ненасыщенного режима к насыщенному при уменьшении числа Россби ниже некоторого критического значения Ro . Для грубой количественной характеристики параметров этой зависимости мы использовали аппроксимацию степенным законом с изломом. Так как точки имеют большой разброс, значительно превышающий статистические ошибки, стандартные методы аппроксимации, такие как минимизация χ^2 или метод наименьших квадратов могут привести к результату, который может зависеть от присутствия в выборке выбросов — точек, значительно отклоняющихся от основного тренда. Поэтому мы применили простую итеративную процедуру, несколько напоминающую упрощенную версию алгоритма RANSAC (Random Sample Consensus), при которой на каждой итерации исключалась небольшая доля f точек, име-

ющих максимальное относительное отклонение по абсолютной величине от модели. Хотя этот метод не сходится в строгом математическом смысле, при малых значениях $f \sim 1\text{--}5\%$ значения параметров модели стабилизируются в широком диапазоне итераций. Для $f = 1\%$ (что соответствует исключению на каждой итерации одной точки) после 10 итераций мы получили следующие значения параметров: наклон при малых и больших значениях Ro соответственно $\beta_1 = -0.24 \pm 0.04$ и $\beta_2 = -5.1 \pm 2.3$, положение слома $Ro_{\text{break}} = 0.25 \pm 0.02$. Аппроксимация производилась в линейных координатах, т.е. для величины L_X/L_{bol} путем минимизации суммы квадратов отклонений. Минимизация χ^2 приводит к близким результатам.

Из рис. 10 видно, что звезды M-класса (нижняя правая панель) обнаруживаются только в режиме насыщения. Это связано с отсутствием измерений периодов вращения для M-звезд ранних классов, населяющих область больших чисел Россби. Аппроксимация зависимости $R_X - Ro$ для M-звезд степенным законом дает наклон $\beta = -0.23 \pm 0.02$, близкий к соответствующему наклону для K-звезд. При аппроксимации мы использовали тот же подход, что и для K-звезд. Размер нашей выборки звезд в Плеядах не позволяет охарактеризовать поведение звезд F- и G-классов.

На основе большой выборки звезд с корональной активностью, выделенной по данным СРГ/еРОЗИТА на западной галактической полусфере, Фроинд и др. (2024) определили положение слома на зависимости $R_X - Ro$ как $\log(Ro_{\text{sat}}) = -1.561 \pm 0.026$ dex. Различие с нашими результатами связано с различным определением числа Россби и, возможно, с тем, что Фроинд и др. (2024) использовали широкую выборку, включающую звезды разных возрастов и химсостава.

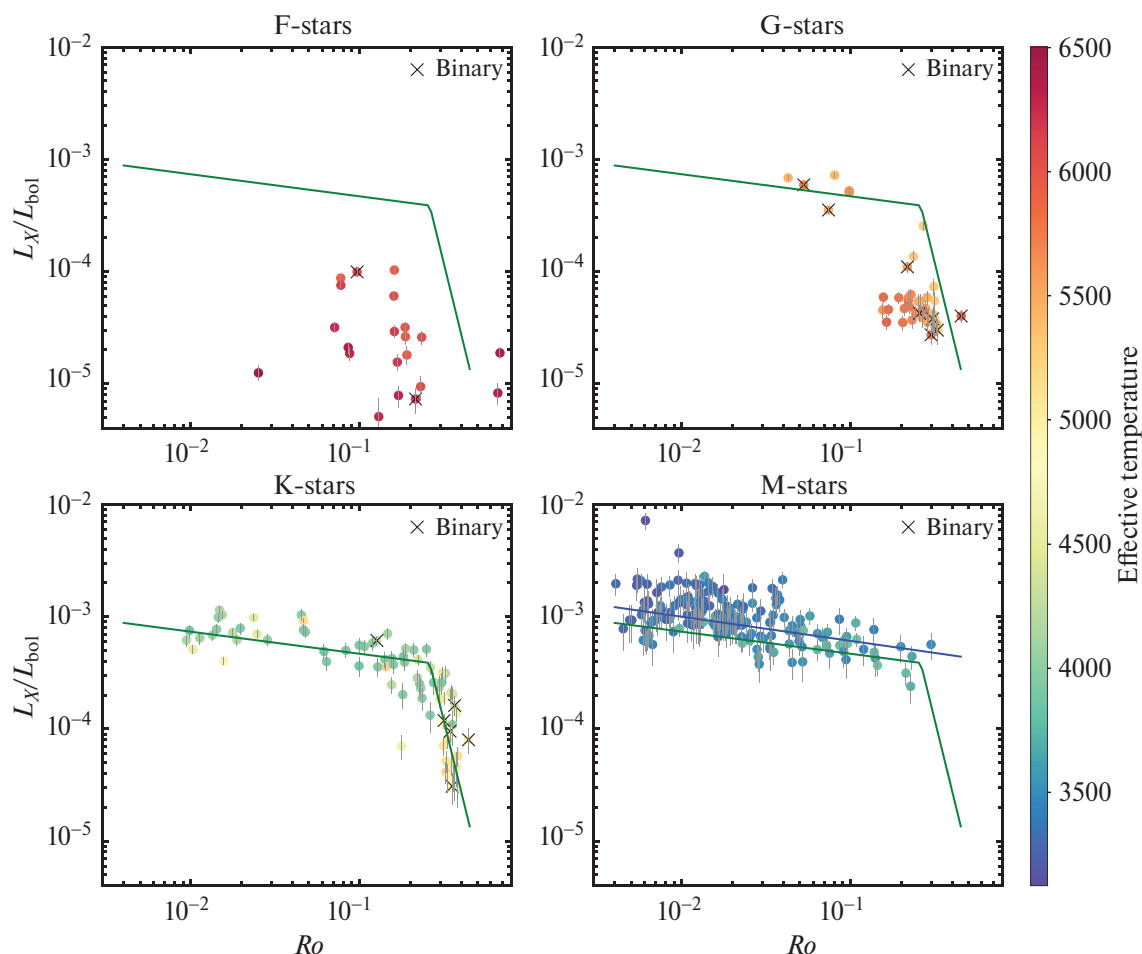


Рис. 10. Зависимости L_X/L_{bol} от числа Россби для звезд, разделенных по спектральным классам F, G, K и M. Зеленой линией на всех графиках показаны результаты подгонки данных для K-звезд степенным законом с изломом. Синей линией на панели для M-звезд показан результат их подгонки степенным законом. Крестиками отмечены источники, у которых обнаружена двойственность по спектральным наблюдениям (Торрес и др., 2021).

СПРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ ROSAT

Более 30 лет назад с помощью рентгеновского телескопа ROSAT и детектора PSPC (Пфефферман и др., 1986; Трюмпер и др., 1991) были проведены длительные наблюдения (~ 31 Кс) области ядра скопления Плеяд радиусом $50'$ (Мичела и др., 1996). Координаты центра поля: $RA = 3^h46^m48^s$, $DEC = 23^\circ54'00''$ [J2000.0]. В общей сложности спутником ROSAT в данной области было идентифицировано 99 звезд Плеяд с рентгеном в диапазоне $0.1\text{--}2.1$ кэВ. В этом же поле по данным еРОЗИТЫ нами было идентифицировано 198 звезд Плеяд.

Для поиска совпадений между источниками еРОЗИТЫ и ROSAT мы отдельно рассмотрели три зоны поля зрения ROSAT в зависимости от углового расстояния до оси телескопа, которые определяют позиционные ошибки источников ROSAT. Следуя подходу использованному в работе Мичела и др. (1996), совпадения между источниками ROSAT и еРОЗИТА искались в кружках с радиусом $30''$,

$60''$ и $120''$ для центральной ($\theta \leq 20'$), средней ($20' < \theta \leq 30'$) и внешней ($30' < \theta \leq 50'$) областей соответственно. Напомним, что точность локализации источников еРОЗИТЫ значительно выше, типичные значения r_{98} не превышают $\sim 10''$. В итоге было найдено 88 совпадений между двумя каталогами. Причем в 22 случаях в круге ошибок ROSAT имеется два источника еРОЗИТЫ. А для 11 источников ROSAT, ассоциированных с Плеядами, рентгеновское излучение по данным еРОЗИТЫ не детектируется на уровне достигнутой за пять обзоров чувствительности. Источники ROSAT, у которых в круге ошибок было найдено более одного источника еРОЗИТЫ, в дальнейшем анализе переменности на масштабе 30 лет не использовались.

В табл. 3 представлен список совпадений источников ROSAT и еРОЗИТЫ.

Сравнение каталогов ROSAT и еРОЗИТЫ позволяет охарактеризовать переменность рентгеновского излучения звезд на масштабе времени ~ 30 лет. Для этой цели мы используем фактор переменности X_{var} .

Таблица 3. Список совпадений источников ePOZITY и ROSAT в области ядра скопления Плеяд радиусом 50'

ID	SRe+	Δ (")	off-axis (')	$\log(L_X)$ (ROSAT)	$\log(L_X)$ (eROSITA)	N_{ero}	N_{gaia}
9	J034342.8+233541	23.7	46.2	29.67	29.66	1	1
11	J034350.8+241448	7.6	45.6	29.25	29.14	2	1
11	J034351.9+241417	41.4	45.6	29.25	28.73	2	1
13	J034351.9+241417	92.3	43.5	29.25	28.73	2	1
13	J034356.7+241317	9.0	43.5	29.25	28.68	2	1
19	J034411.3+232245	15.3	47.6	29.93	29.78	1	1
20	J034412.8+240152	7.0	36.4	29.76	29.86	1	2
21	J034412.8+240152	4.4	36.3	29.76	29.86	1	2
22	J034414.7+240605	7.3	37.1	29.86	30.10	1	2
23	J034416.6+233703	3.2	38.6	29.82	28.88	1	1
26	J034423.1+240403	4.2	34.6	29.08	29.43	1	1
27	J034423.5+240757	4.4	35.9	29.48	29.90	1	1

Примечание. Полная таблица доступна в архиве Центра астрономических данных в Страсбурге. Столбцы имеют следующие обозначения: 1) идентификационный номер источника ROSAT в табл. 1 из работы Мичела и др. (1996); 2) идентификатор источника в каталоге СРГ/ePOZITA; 3) расстояние между источниками ROSAT и ePOZITY; 4) расстояние рентгеновского источника ROSAT от оси телескопа в угл. мин; 5) логарифм рентгеновской светимости источника по данным ROSAT в диапазоне 0.1–2.1 кэВ в единицах эрг/с; 6) логарифм рентгеновской светимости источника по данным ePOZITY в диапазоне 0.3–2.3 кэВ в единицах эрг/с; 7) N_{ero} — число источников ePOZITY в Плеядах, попавших в круг ошибок источника ROSAT, отождествленного ранее со звездой скопления; 8) N_{gaia} — число оптических источников Плеяд из каталога 6d, построенного на основе Gaia DR3, в круге ошибок r_{98} рентгеновского источника ePOZITY.

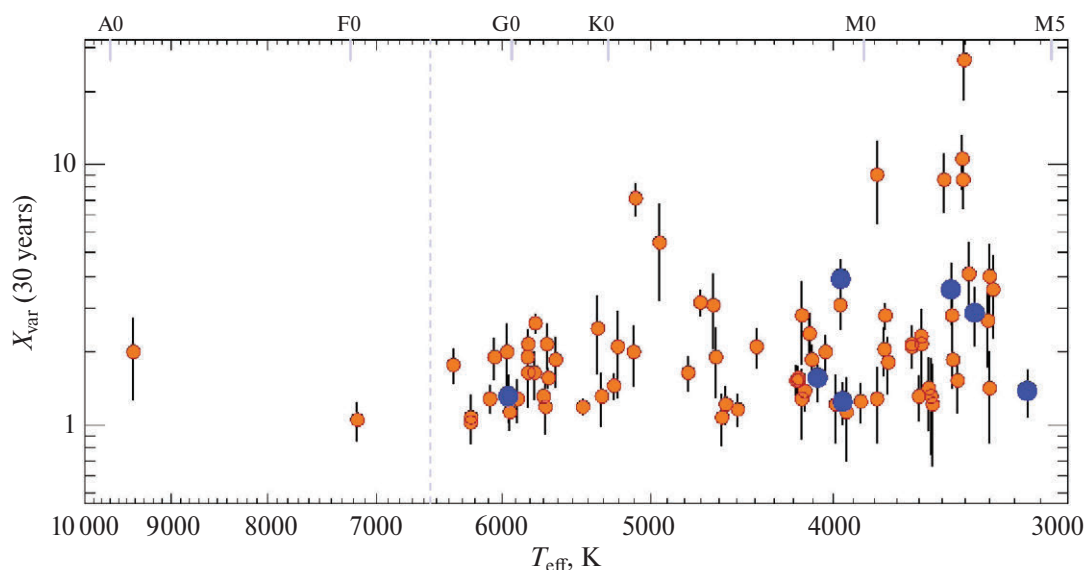


Рис. 11. Рентгеновская переменность источников в Плеядах по данным ROSAT и ePOZITY на 30-летней шкале в зависимости от T_{eff} звезды. Синими символами показаны источники, у которых рентгеновская переменность среди пяти обзоров, т.е. на базе двух лет, превышает фактор 5.

Для вычисления X_{var} были использованы только те источники, у которых в круге ошибок ROSAT был найден только один источник ePOZITY. Для каждого источника по двум значениям светимости — $L_{X, \text{ROSAT}}$ и $L_{X, \text{eROSITA}}$, фактор X_{var} вычислялся как отношение большего значения к меньшему. На рис. 11 показана зависимость X_{var} от эффективной температуры звезды. Из рисунка следует, что несколько источников поздних спектральных классов демонстрируют переменность порядка или более, чем ~ 10 раз. Остальные же источники умеренно переменны, с фактором

изменения потока до ~ 3 –4 раз за 30 лет. Также отметим, что источники, сильнопеременные в течение обзора ePOZITY — на масштабе двух лет, часто не демонстрируют сильную переменность на масштабе 30 лет. Это также подтверждает рис. 12, на котором показана связь между X_{var} на временном масштабе двух лет по данным ePOZITY и на временном масштабе 30 лет. Из рис. 12 также можно сделать вывод, что звезды сильно переменные на 30-летнем масштабе, демонстрируют умеренную переменность на масштабе двух лет и наоборот. Однако для подтверждения до-

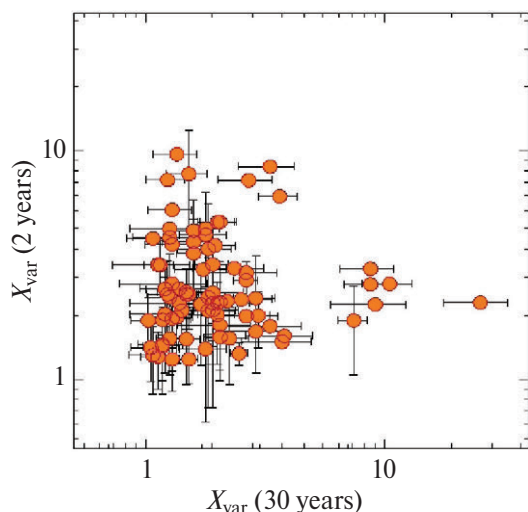


Рис. 12. Связь между X_{var} на временном масштабе двух лет по данным еРОЗИТЫ и на временном масштабе 30 лет.

стоверности этого вывода и исследования причин такого поведения требуются выборки большего размера. Эта работа будет продолжена в будущих публикациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плеяды, как и все рассеянные звездные скопления, под приливным воздействием Галактики и гигантских молекулярных облаков распадаются. При этом кинематические параметры, характерные для скопления, сильно размываются. Большинство членов молодых рассеянных скоплений показывают сильную магнитную активность, что приводит к разогреву корон звезд до нескольких миллионов градусов. Таким образом, источники являются яркими в рентгеновских лучах. Хотя у одиночных звезд солнечного типа в процессе взаимодействия магнитного поля со звездным ветром магнитная активность падает на масштабе времени ~ 1 млрд лет, для холодных звезд М-класса она продолжается в течение более длительного времени. Плеяды — это достаточно молодое скопление с возрастом около 125 млн. лет, поэтому можно ожидать, что доля звезд с рентгеновским излучением должна быть достаточно высока.

Область неба вокруг рассеянного звездного скопления Плеяды вошла в пять обзоров неба, проведенных с помощью рентгеновского телескопа еРОЗИТА орбитальной обсерватории СРГ. В результате, в диапазоне энергий 0.3–2.3 кэВ была достигнута чувствительность по потоку $F_{X,0.3-2.3} \sim 7.4 \times 10^{-15}$ эрг/с/см². На удалении Плеяд (135 пк) она соответствует рентгеновской светимости $L_{X,0.3-2.3} \sim 1.6 \times 10^{28}$ эрг/с. По пяти обзорам всего неба СРГ/еРОЗИТЫ 850 рентгеновских источника еРОЗИТЫ были ассоциированы со звездами скопления. Для отождествления использовался каталог оптических звезд Плеяд, построен-

ный на основе данных GAIA DR3 (Жерял и др., 2023). При этом в 38 случаях в круг 98% ошибок локализации попадало по две звезды Плеяд. Звезды с рентгеновским излучением обнаруживаются во всех спектральных диапазонах — от раннего А-класса и до поздних М-карликов (М5V). Учитывая, что рентгеновская светимость звезд А-класса (Дрейк и др., 2014; Понтер и др., 2022) на несколько порядков ниже предельного уровня светимости, достигнутой в обзоре еРОЗИТЫ на расстоянии Плеяд, регистрируемое рентгеновское излучение А-звезд обусловлено, скорее всего, наличием холодного вторичного компонента в двойной системе. Источники еРОЗИТЫ, ассоциированные с Плеядами, излучают в рентгеновских лучах с суммарной светимостью $L_{X,\text{total}} \sim 1.3 \times 10^{32}$ эрг/с. Наибольшая рентгеновская светимость наблюдается у звезды G-класса $L_{X,0.3-2.3} \sim 2 \times 10^{30}$ эрг/с.

Для 27 источников детекторы еРОЗИТЫ зарегистрировали сильную рентгеновскую переменность между обзорами — с отношением максимального к минимальному потоку в 10 и более раз. Большинство из них известны как эруптивные оптические переменные звезды dM-класса.

Логарифм отношения рентгеновской к болометрической светимости звезд Плеяд $R_X = \log(L_X/L_{\text{bol}})$ растет от -5 до -2 с уменьшением эффективной температуры звезды. Само распределение звезд по величине R_X носит бимодальный характер с максимумами в районе $R_X \sim -4.3$ и $R_X \sim -3.1$. Левый пик с меньшим значением R_X образован звездами FGK-классов, а правый пик на $R_X \sim -3.1$ в основном населен звездами М-класса, хотя другие спектральные классы с конвективными оболочками также вносят вклад. Происхождение локуса источников в области $R_X \sim -4.3$ является дискуссионным и может быть объяснено либо различиями в физических свойствах между звездами различных спектральных классов, либо двойственностью типа SB1.

Зависимость величины R_X от числа Россби имеет сложный характер и различается для звезд разных спектральных классов. Данные для звезд К-класса могут быть описаны степенным законом со сломом, так что при малых числах Россби зависимость величины R_X от числа Россби слабая, а выше некоторого порогового значения $Ro \sim 0.25$ она сильно укрупняется. Такое поведение можно проинтерпретировать как насыщение корональной активности при малых числах Россби и уже отмечалось в работах других авторов (Вилху, 1984; Райт и др., 2011; Фроинд и др., 2024). Звезды М-класса обнаруживаются только в режиме насыщения. В интервале значений числа Россби, покрытом нашей выборкой из звезд G-класса, $Ro \sim 0.04 \div 0.4$, основная часть источников лежит в полосе с близкими значениями $R_X \sim -4.3$. Распределение $Ro-R_X$ для звезд F-класса носит более хаотичный характер, не следуя подгонкам корональной активности К-звезд. Однако отметим, что размер нашей выборки недоста-

точен для детальной характеристики поведения F- и G-звезд.

Проведено сравнение с каталогом ROSAT в области ядра скопления. По данным ePOZITY в данной области отождествлено 198 звезд и найдено 88 совпадений с ROSAT. Причем для 22 источников ROSAT в круге ошибок имеется по два источника ePOZITY. Не обнаруживается на уровне чувствительности ePOZITY 11 источников ROSAT, ассоциированных со звездами Плеяд. Мы сравнили переменность источников на масштабах 30 лет и 2 года.

Это исследование основано на наблюдениях телескопа ePOZITA на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/ePOZITA изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (МРЕ) при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Используемые в настоящей работе данные телескопа ePOZITA обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом ePOZITA и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа СРГ/ePOZITA. В данном исследовании использовалась база данных SIMBAD, функционирующая в CDS, Страсбург, Франция.

Авторы благодарны анонимному рецензенту за обстоятельную и конструктивную рецензию, которая помогла улучшить статью.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-12-00292.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белл и др. (C.P.M. Bell, T. Naylor, N.J. Mayne, R.D. Jeffries, and S.P. Littlefair), *MNRAS* **424**, 3178 (2012).
- Брессан и др. (A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, et al.), *MNRAS* **427**, 127 (2012).
- Бриггс, Пай (K.R. Briggs and J.P. Pye), *MNRAS* **345**, 714 (2003).
- Будер и др. (S. Buder, S. Sharma, J. Kos, A.M. Amarsi, T. Nordlander, K. Lind, et al.), *MNRAS* **506**, 150 (2021).
- Вайана и др. (G.S. Vaiana, J.P. Cassinelli, G. Fabbiano, R. Giacconi, L. Golub, P. Gorenstein, et al.), *Astrophys. J.* **245**, 163 (1981).
- Вейсскопф и др. (M.C. Weisskopf, B. Brinkman, C. Canizares, G. Garmire, S. Murray, and L.P. Van Speybroeck), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114**, 1 (2002).
- Вилху (O. Vilhu), *Astron. Astrophys.* **133**, 117 (1984).
- Годой-Ривера и др. (D. Godoy-Rivera, M.H. Pinsonneault, and L.M. Rebull), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **257**, 46 (2021).
- Гуарчелло и др. (M.G. Guarcello, G. Micela, S. Sciortino, J. López-Santiago, C. Argiroffi, F. Reale, et al.), *Astron. Astrophys.* **622**, A210 (2019).
- Гюдель, Назе (M. Güdel and Y. Nazé), *Astron. Astrophys. Rev.* **17**, 309 (2009).
- Гюнтер и др. (H.M. Günther, C. Melis, J. Robrade, P.C. Schneider, S.J. Wolk, and R.K. Yadav), *Astron. J.* **164**, 8 (2022).
- Даниель и др. (K.J. Daniel, J.L. Linsky, and M. Gagné), *Astrophys. J.* **578**, 486 (2002).
- Джаккони и др. (R. Giacconi, G. Branduardi, U. Briel, A. Epstein, D. Fabricant, E. Feigelson, et al.), *Astrophys. J.* **230**, 540 (1979).
- Дрейк и др. (J.J. Drake, J. Braithwaite, V. Kashyap, H.M. Günther, and N.J. Wright), *Astrophys. J.* **786**, 136 (2014).
- Жерял и др. (M. Žerjal, N. Lodieu, A. Pérez-Garrido, J. Olivares, V.J.S. Béjar, and E.L. Martín), *Astron. Astrophys.* **678**, A75 (2023).
- Кришнамурти и др. (A. Krishnamurthi, C.S. Reynolds, J.L. Linsky, E. Martín, and M. Gagné), *Astron. J.* **121**, 337 (2001).
- Лодье и др. (N. Lodieu, A. Pérez-Garrido, R.L. Smart, and R. Silvotti), *Astron. Astrophys.* **628**, A66 (2019).
- Мичела и др. (G. Micela, S. Sciortino, S. Serio, G.S. Vaiana, J. Bookbinder, L. Golub, et al.), *Astrophys. J.* **292**, 172 (1985).
- Мичела и др. (G. Micela, S. Sciortino, G.S. Vaiana, J. Harnden, F.R.Jr. Rosner, and J.H.M.M. Schmitt), *Astrophys. J.* **348**, 557 (1990).
- Мичела и др. (G. Micela, S. Sciortino, V. Kashyap, J. Harnden, and F.R.Jr. Rosner), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **102**, 75 (1996).
- Нетопил и др. (M. Netopil, E. Paunzen, U. Heiter, and C. Soubiran), *Astron. Astrophys.* **585**, A150 (2016).
- Нунез и др. (A. Núnēz, M.A. Agueros, K.R. Covey, S.T. Douglas, J.J. Drake, R. Rampalli, et al.), *Astrophys. J.* **931**, 45 (2022).
- Пеко, Мамажек (M.J. Pecaut and E.E. Mamajek), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208**, 9 (2013).
- Предел и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1, 16 (2021).
- Пфефферман и др. (E. Pfeffermann and U.G. Briel), in J.L. Culhane (ed.), *X-ray instrumentation in astronomy*, Vol. 597 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conf. Ser., p. 208–212 (1986).
- Райт и др. (N.J. Wright, J.J. Drake, E.E. Mamajek, and G.W. Henry), *Astrophys. J.* **743**, 48 (2011).
- Сомерс и др. (G. Somers, L. Cao, and M.H. Pinsonneault), *Astrophys. J.* **891**, 29 (2020).
- Стауффер и др. (J.R. Stauffer, J.P. Caillault, M. Gagne, C.F. Prosser, and L.W. Hartmann), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **91**, 625 (1994).

29. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132, 29 (2021).
30. Торрес и др. (G. Torres, D.W. Latham, and S.N. Quinn), *Astrophys. J.* **921**, 117 (2021).
31. Трюмпер и др. (J. Trümper, G. Hasinger, B. Aschenbach, H. Bräuninger, U.G. Briel, W. Burkert, et al.), *Nature* **349**, 579 (1991).
32. Фроинд и др. (S. Freund, S. Czesla, P. Predehl, J. Robrade, M. Salvato, P.C. Schneider, et al.), *Astron. Astrophys.* **684**, A121 (2024).
33. Шмитт и др. (J.H.M.M. Schmitt, P. Kahabka, J. Stauffer, and A.J.M. Piers), *Astron. Astrophys.* **277**, 114 (1993).
34. Янсен и др. (F. Jansen, D. Lumb, B. Altieri, J. Clavel, M. Ehle, C. Erd, et al.), *Astron. Astrophys.* **365**, L1 (2001).