

Исследование переменности и вспышечной активности рентгеновского излучения звезд типа γ Cas

Е. Б. Рыспаева

Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Звезды типа γ Cassiopeia (аналоги γ Cas)

Звезды типа γ Cas – подкласс (1%) Oe-Be звезд, их оптические спектры не отличаются от спектров других Be звезд. Звезды этого типа выделяются по их аномальному рентгеновскому спектру.

Основные характеристики

- 1) Рентгеновские светимости $L_X \sim 10^{31}-10^{33}$ erg/s;
- 2) Температура излучающей в рентгене плазмы звезд типа γ Cas достигает 10-20 keV и более, в предположении, что рентгеновское излучение чисто тепловое;
- 3) Жесткость рентгеновских спектров звезд типа γ Cas превышает 50%;
- 4) Рентгеновское излучение переменное на шкалах времени вплоть до минут.

К настоящему времени известно 26 звезд типа γ Cas и 2 кандидата. **16** звезд этого типа могут наблюдаться в России ($\delta > -10^\circ$)

Возможные механизмы генерации рентгеновского излучения звезд типа γ Cas

- 1) Двойственность. Излучение маломассивной звезды или аккреция на компактный компонент
 - a) Нейтронную звезду (Postnov et al., 2017)
 - b) Белый карлик (Vieira et al. 2017)
 - c) Маломассивная вспыхивающая звезда
- 2) Взаимодействие декреционного диска с локальным магнитным полем звезды (Smith et al. 2016)
- 3) Возможное нетепловое рентгеновское излучение, возникающее в результате обратного комптоновского рассеяния UV фотонов на релятивистских электронах в рамках Chen & White (1991) model (Ryspaeva & Kholtygin 2021, 2021a)
- 4) Фотосферная активность (аналог солнечных вспышек)

Критика

- 1a) Число таких звезд типа γ Cas слишком мало, а потоки в линии $K\alpha$ существенно меньше наблюдаемых
- 1b) Данная модель требует темпов потери массы выше $10^{-8} M_{\text{sun}}/\text{год}$, что на 2-3 порядка выше реальных скоростей
- 1c) Маломассивные вспыхивающие звезды до главной последовательности не обладают жестким спектром
- 2) Нет детальных вычислений
- 3) Непонятен механизм генерации большого числа релятивистских электронов
- 4) Нет детальных исследований

CHARACTERIZATION OF THE X-RAY LIGHT CURVE OF THE γ Cas-LIKE B1e STAR HD 110432

MYRON A. SMITH¹, RAIMUNDO LOPES DE OLIVEIRA², AND CHRISTIAN MOTCH³

¹ Catholic University of America, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA; msmith@stsci.edu

² Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon s/n, 49100-000 São Cristóvão, SE, Brazil

³ Observatoire Astronomique, Université de Strasbourg, CNRS UMR 7550, 11 rue de l'Université, F-67000 Strasbourg, France

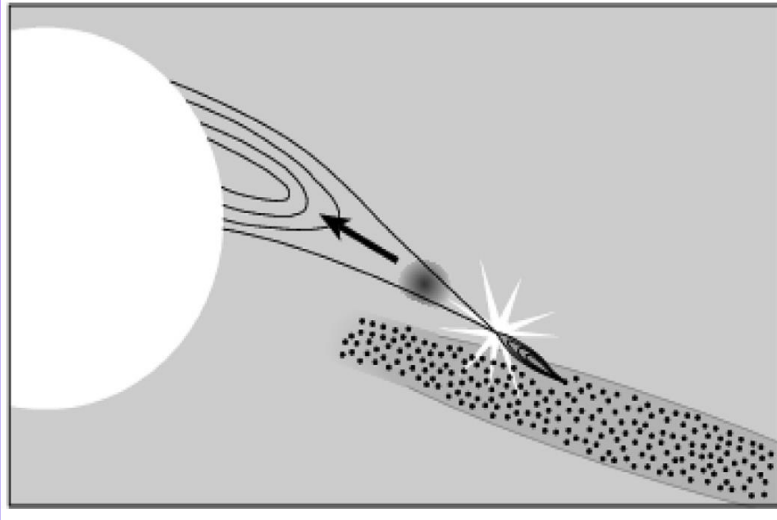
Received 2011 December 26; accepted 2012 June 4; published 2012 July 26

Авторы проанализировали длительные кривые блеска, полученные на спутниках *RXTE* (2010 г.) и *XMM-Newton* (2002, 2003, 2007 г.) и обнаружили три типа вариаций рентгеновского излучения:

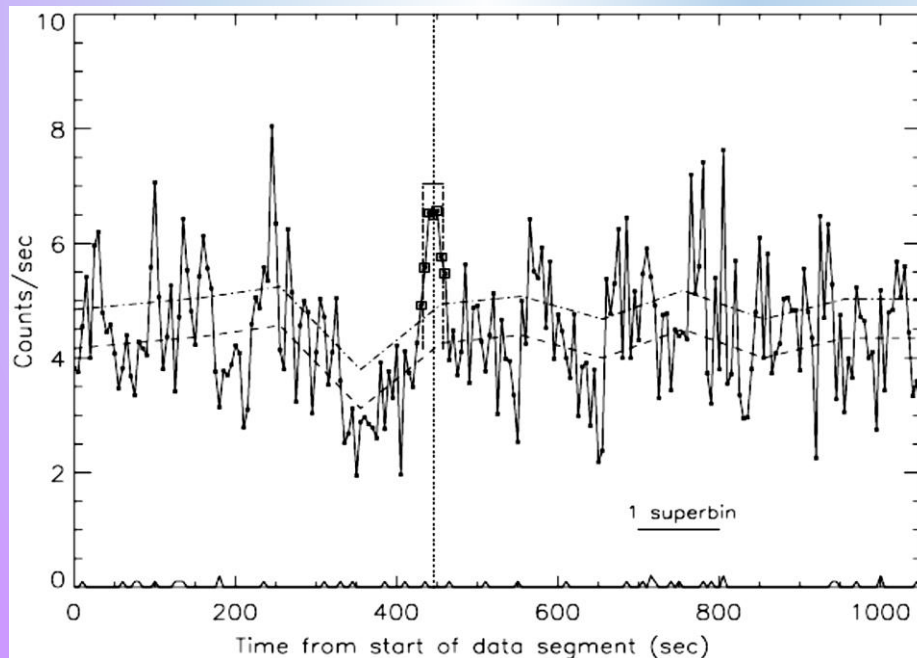
1. **Длительные с периодом в несколько месяцев**
2. **Средние с периодом в несколько часов**
3. **Быстрые вспышки (вспышечные события) продолжительностью от нескольких секунд до 1-1.5 мин**

По данным *RXTE* был выявлен период рентгеновского излучения $P \sim 226$ дней, в наблюдениях *XMM-Newton* – 1615 быстрых вспышек («flare-like events»). Авторы объясняли природу этих вспышек либо взаимодействием магнитных полей звезды и декреционного диска, либо аккрецией неоднородностей звездного ветра на вырожденный компонент звезды (предположительно белый карлик).

Взаимодействие локальных магнитных полей звезды и магнитного поля диска



Взаимодействие между системами магнитных петель звезды типа γ Cas и декреционным диском (показан в экваториальной плоскости). Ускорение вещества после пересоединения линий поля после их первоначального запутывания и разрыва, частицы могут ускоряться по направлению как к звезде, так и к диску (Smith et al., 2016). Пересоединение магнитных силовых линий приводит к появлению рентгеновских вспышек, которые будут давать значимый вклад в рентгеновское излучение звезд.



Выделение вспышки в интервале времени 445 с (пунктир) в рентгеновской кривой блеска VZ Sgr в 2002 г. Скорость счета фона показана в нижней части графика. Интегральный отсчет и длительность вспышки на полуамплитуде составляют 14,5 отсчетов ($1,5 \times 10^{33}$ эрг/с) и 32,5 с. Нижняя пунктирная линия - скорости отсчета 45% процентиля; верхний - уровень 1σ над ними. Квадратные символы - наблюдаемые потоки (Smith et al. 2012).

Постановка задачи

В настоящей работе усовершенствована методика поиска аналогичных найденным Smith et al. (2012) быстрых вспышек, описанная в работе Рыспаевой (2024). Рассмотрены кривые блеска 7 звезд аналогов γ Cas, полученных на спутнике *XMM-Newton*.

Выполнены:

1. Поиск периодичности рентгеновского излучения методом CLEAN и построение фазовых кривых блеска для найденных периодов;
2. Вычитание периодических компонент из кривых блеска с шагами 5 с и 1 с и поиск быстрых вспышек на разных диапазонах энергий (0.2-1 кэВ, 1-2 кэВ, 2-4 кэВ, 4-8 кэВ).
3. Анализ профилей и мощностей обнаруженных вспышек
4. Сравнение результатов поиска вспышек в кривых блеска с шагом 1 с и 5 с.

Обнаруженные периодичности рентгеновского излучения рассмотренных звезд

Звезда	P, ч	P, с	FPE, отн. ед.
HD120991	3,26	11743	0,181
HD130437	0,60	2164	0,514
	0,26	920	0,301
HD162718	1,07	3846	0,259
HD183362	1,37	4914	0,52
HD42054	2,84	10220	0,244
HD44458	1,25	4510	0,369
	0,72	2577	0,238
HD45314	1,88	6751	0,235
HD45995	1,25	4510	0,246
SAO49725	3,83	13782	0,309

$$FPE = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \text{ (Fraction of periodical emission) – доля пульсирующего излучения.}$$

Методы выявления быстрых вспышек

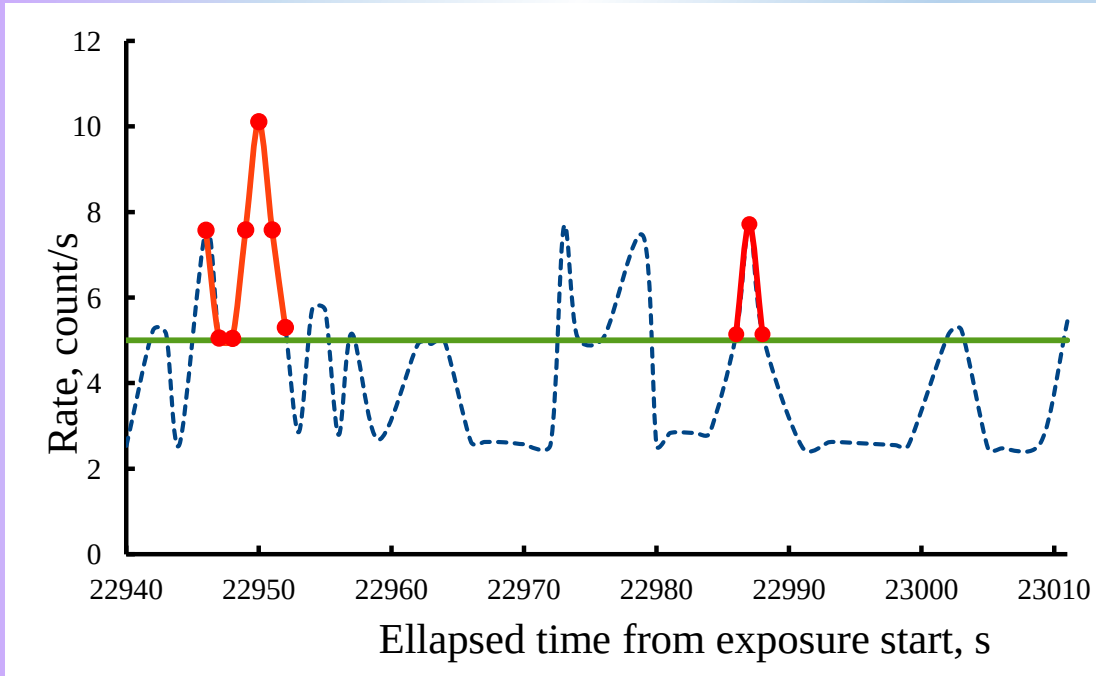
1. Кривые блеска были разделены на фрагменты длительностью в 1 кс, в каждом из которых были вычислены средние значения скорости счета $\langle rate \rangle$ и соответствующее им математическое ожидание чисел прихода фотонов $\lambda = \langle rate \rangle \cdot 5s$. Были оценены вероятности регистрации заданного числа фотонов в предположении, что эти вероятности описываются распределением Пуассона. Вспышками считались регистрации числа, вероятность которого ниже ε . Величина ε выбиралась так, чтобы она была меньше вероятности того, что скорость прихода фотонов превышает значение $\langle rate \rangle$ по крайней мере на одно стандартное отклонение, чаще всего $\varepsilon \sim 0.15-0.30$. Числа фотонов с вероятностью меньше ε считались гипотетическим «уровнем без вспышек».

2. В каждой кривой блеска было определено самое распространенное значение скорости счета с отклонением 0.1 («мода» кривой блеска), оно принималось за «уровень» без вспышек. Моменты кривой блеска, где скорость счета превышает 1.1 от «моды» считались вспышечными. Этот способ применялся если доля скоростей счета, соответствующих «моде» во всей кривой блеска превышала 60%.

Были определены количества вспышек, их продолжительности и интегральные мощности (методом трапеций), доли мощностей вспышек в мощности всех кривых блеска. Найденные вспышки разделены на простые составные и точечные.

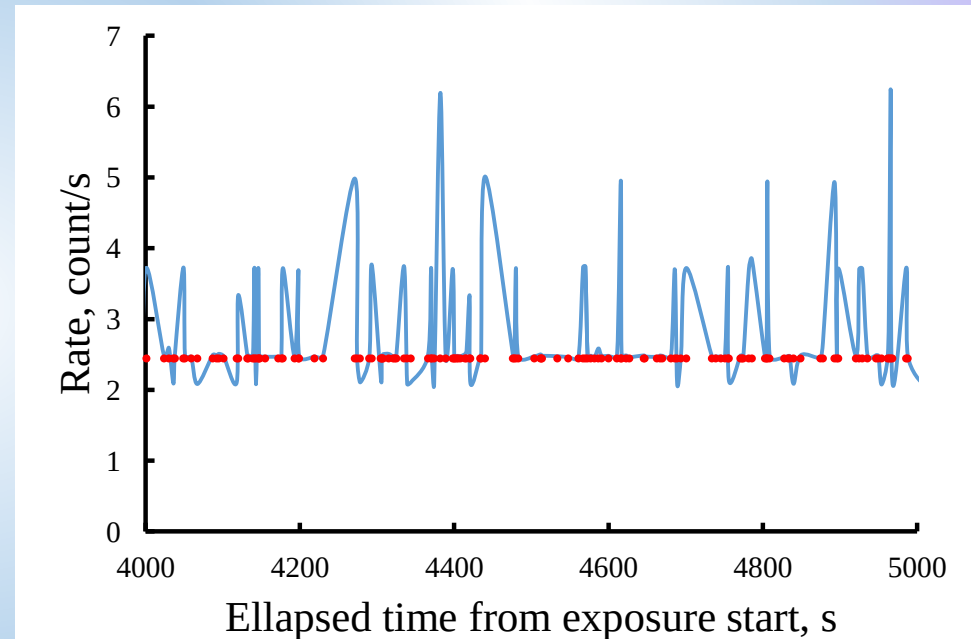
Иллюстрация метода выявления быстрых вспышек

Фрагмент кривой блеска звезды
HD 110432 (BZ Cru) с шагом 1 с



Красными линиями показаны профили обнаруженных вспышек, зеленой горизонтальной линией - «уровень без вспышек».

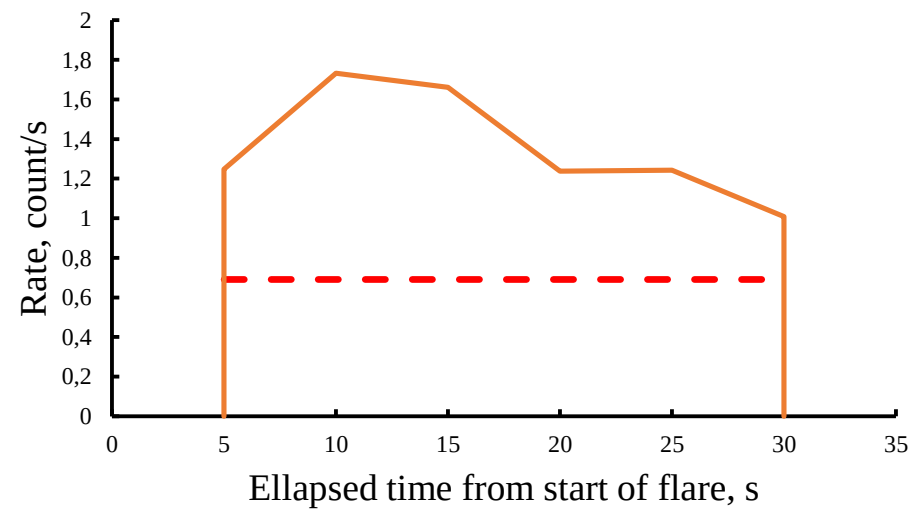
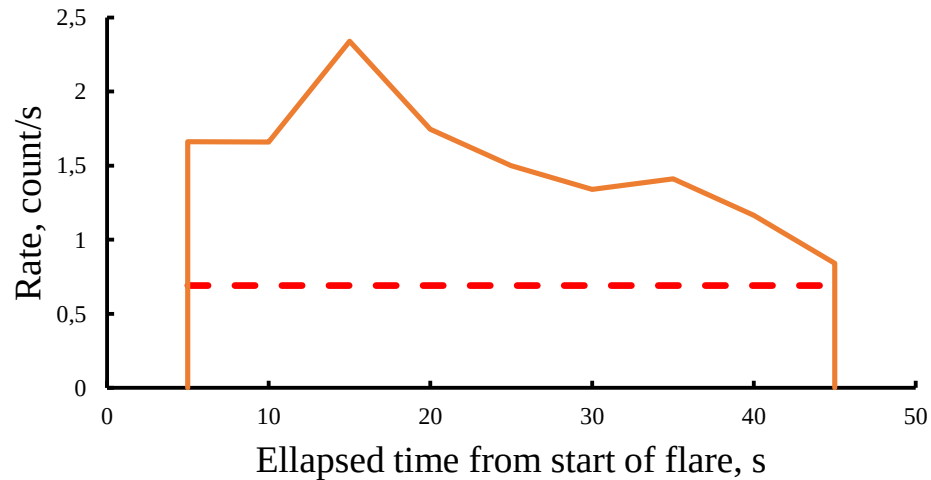
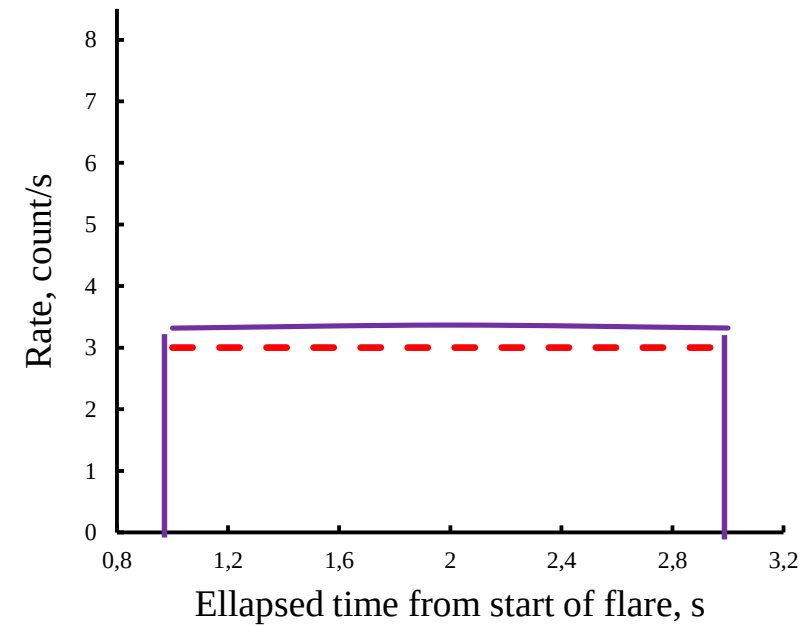
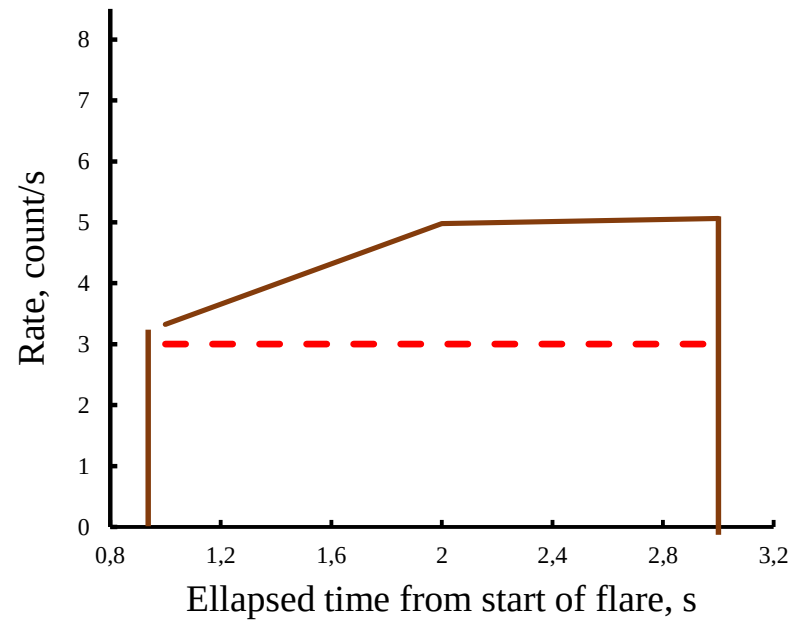
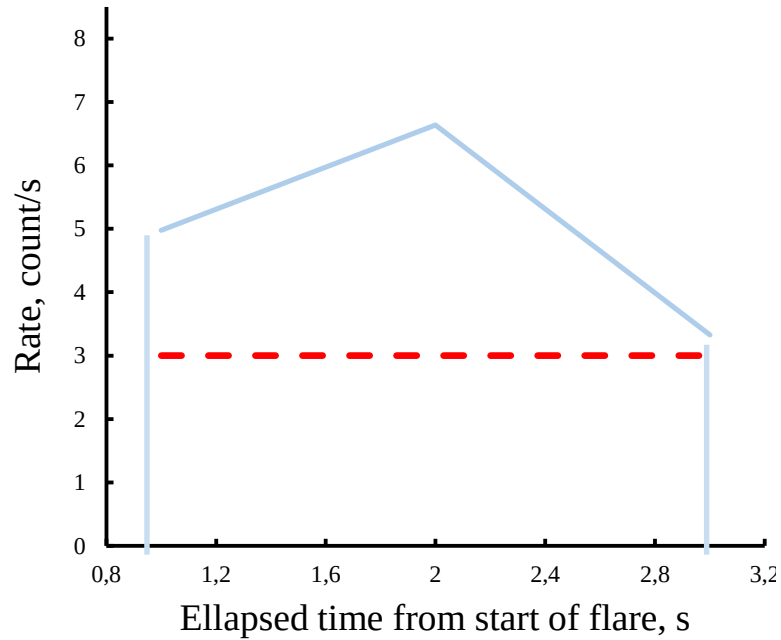
Фрагмент кривой блеска звезды
HD 120991 с шагом 1 с



Красным цветом выделены точки соответствующие «моде» кривой блеска, их доля во всей кривой составляет 65%.

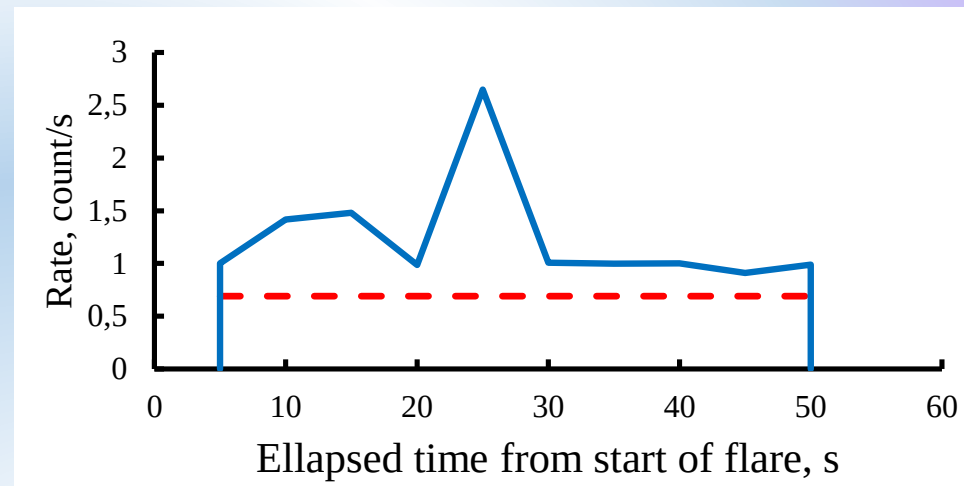
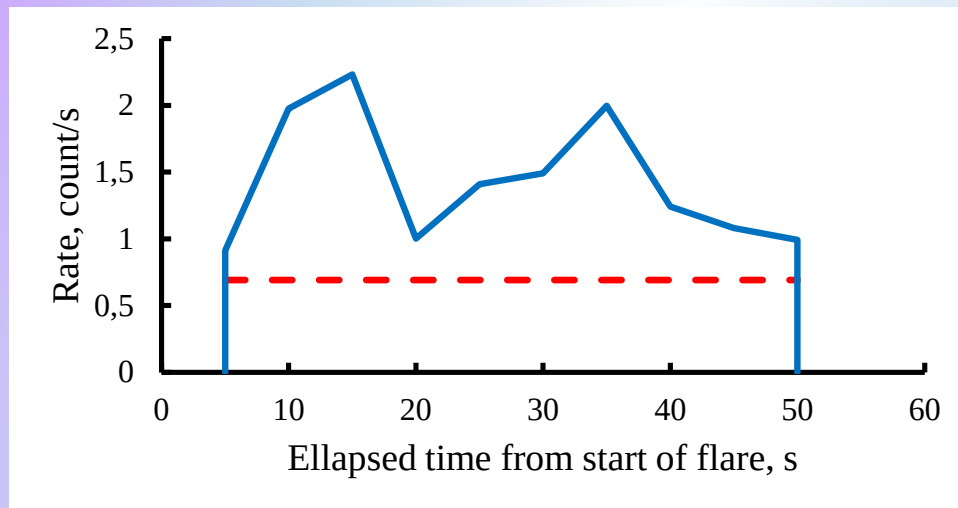
Профили быстрых вспышек

Простые



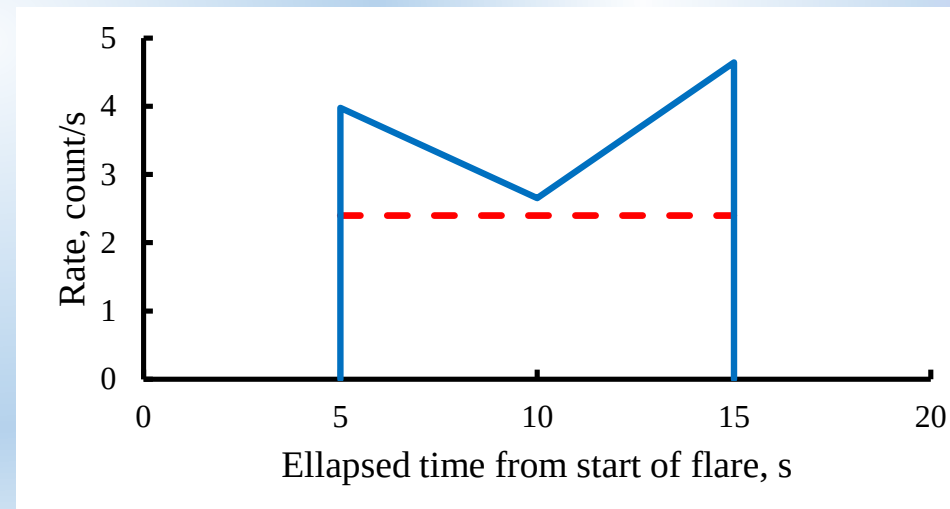
Профили быстрых вспышек

Составные



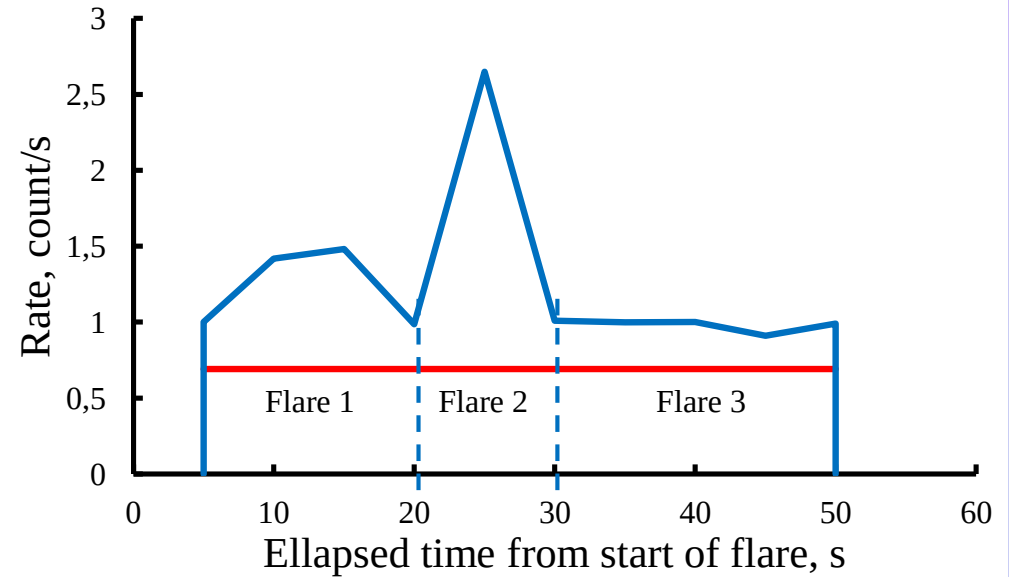
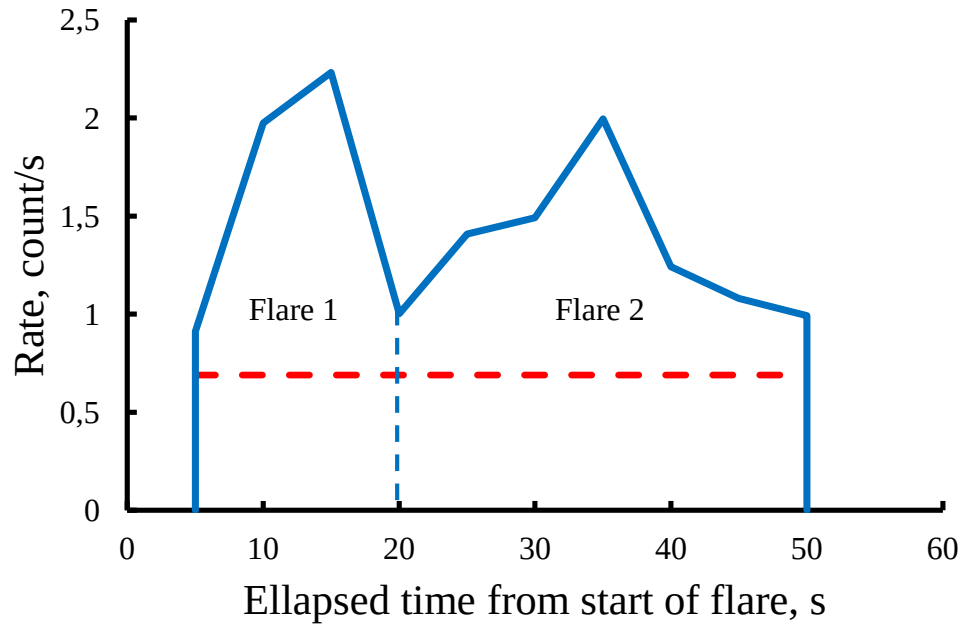
К таковым относятся профили с локальным минимумом соответствующие критерию:

$$\frac{(R_{\max} - R_{\min})}{(R_{\max} + R_{\min})} > 0.3$$



Дополнительно учтены точечные вспышки, длительностью в один шаг кривой блеска, состоящие из одной точки.

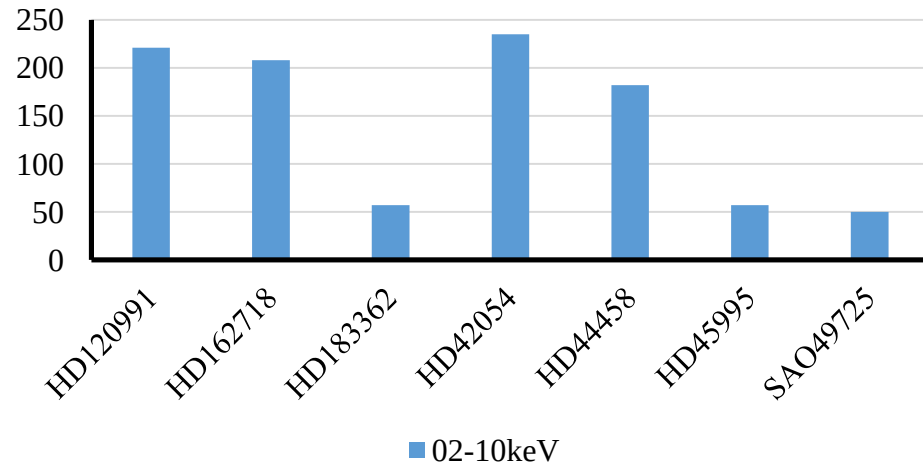
Разделение составных вспышек



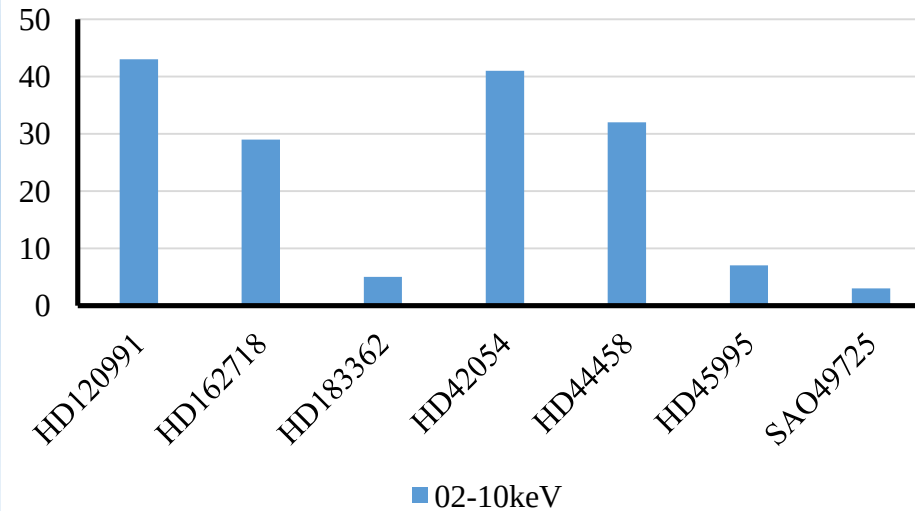
Предполагается, что составные вспышки являются группами более коротких вспышек, произошедших через очень короткое время. Трехточечные М-образные вспышки разделялись на две точечные. Но разделение вспышек может быть неоднозначным.

Гистограммы чисел вспышек в кривых блеска с шагом 5 с

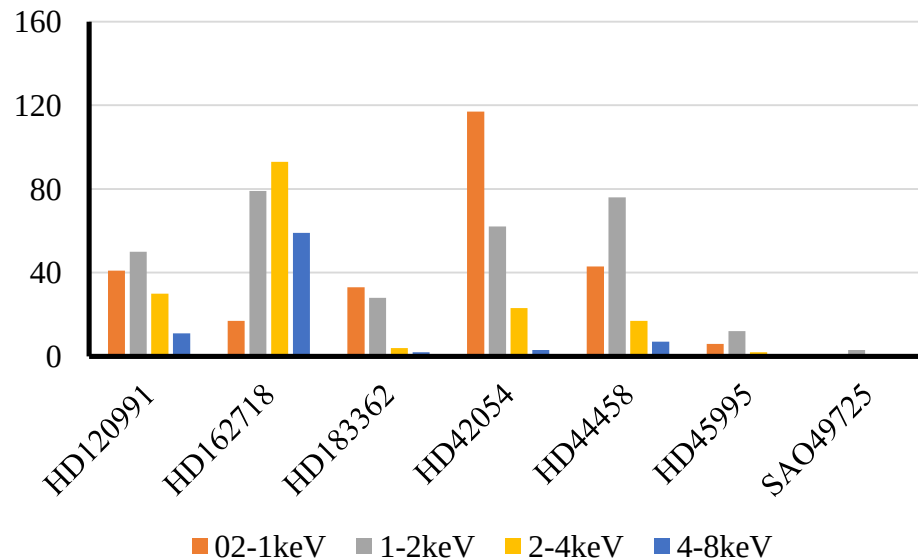
Все вспышки



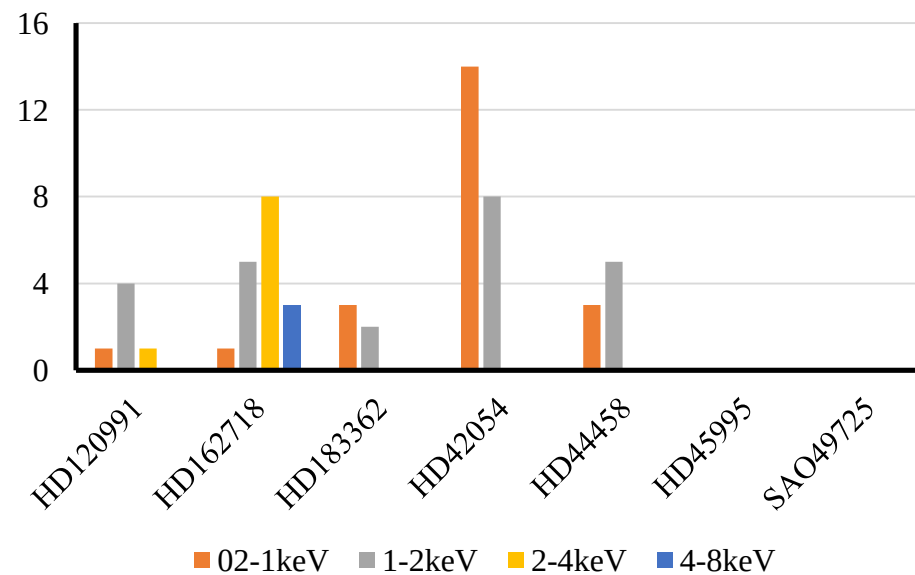
Вспышки с 2 и более точками



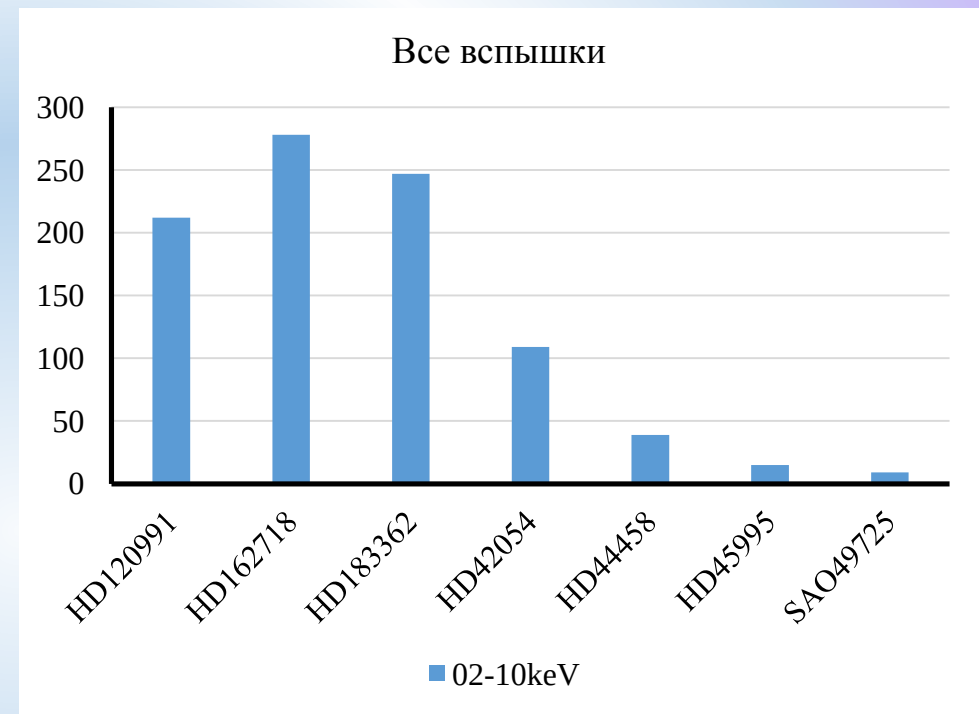
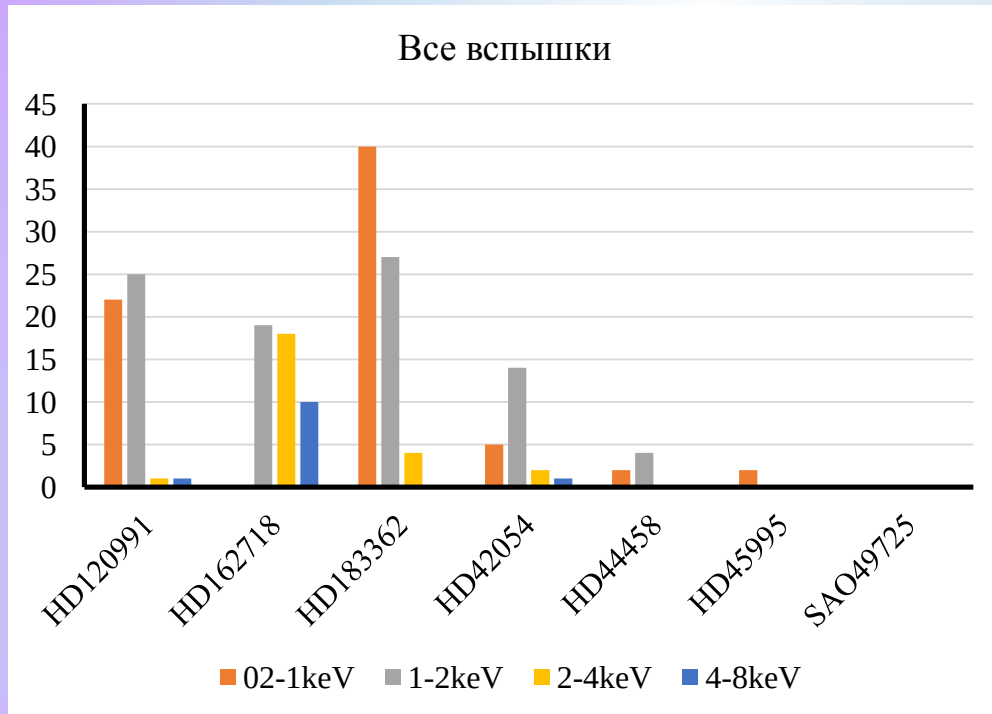
Все вспышки



Вспышки с 2 и более точками

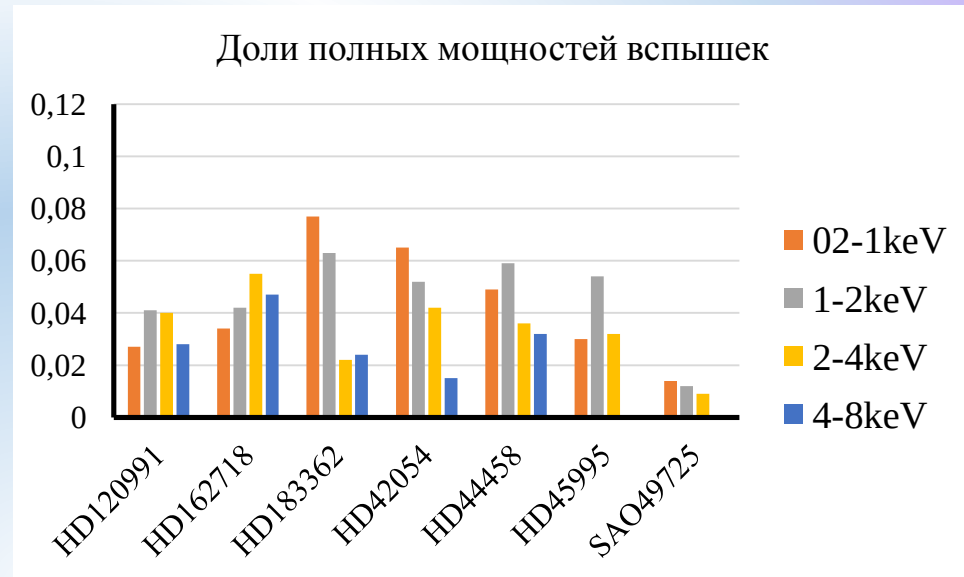
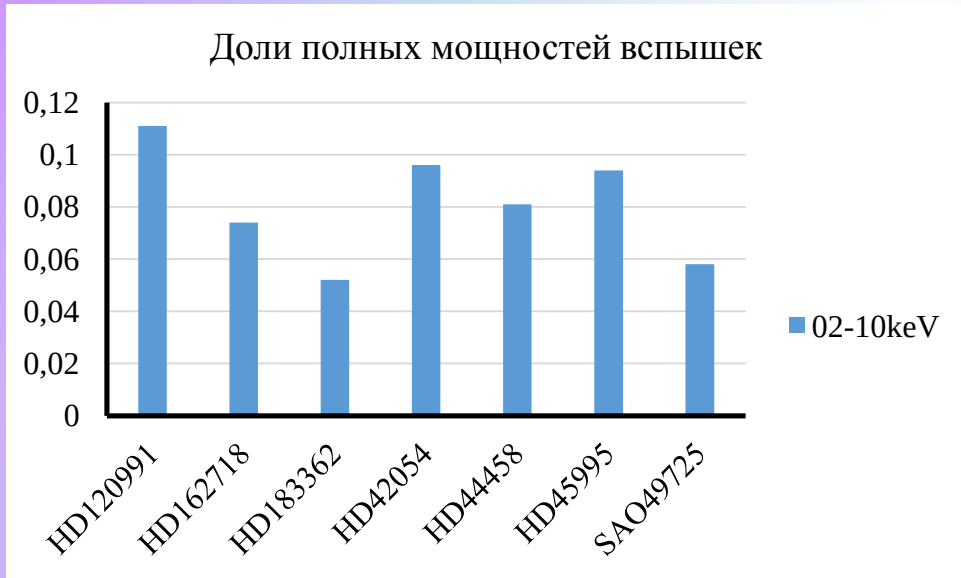


Гистограммы чисел вспышек в кривых блеска с шагом 1 с

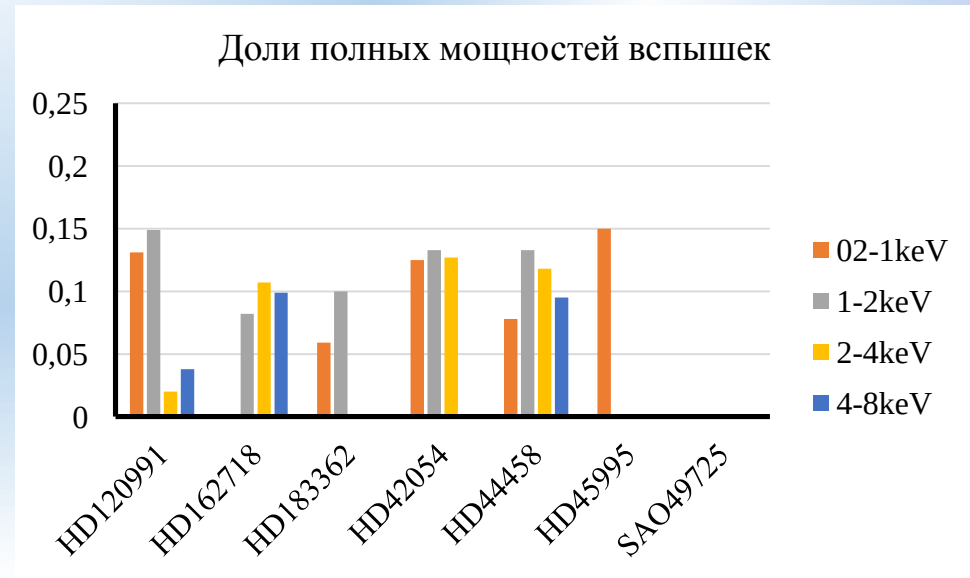
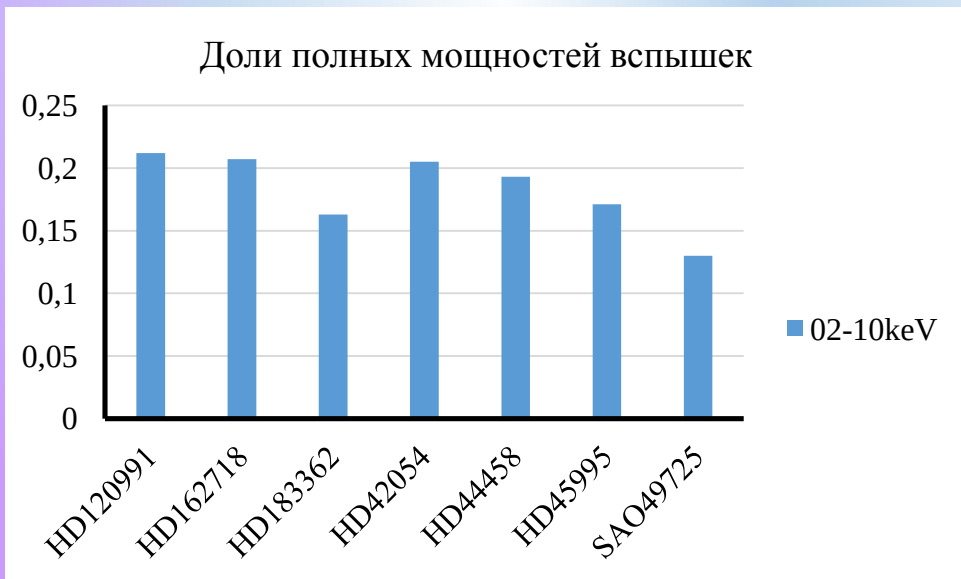


Вспышки с двумя и более точками составляют очень малую часть от всех обнаруженных.

Гистограммы долей полных мощностей вспышек в кривых блеска с шагом 5 с



Гистограммы долей полных мощностей вспышек в кривых блеска с шагом 1 с



Результаты

В работе получен ряд следующих важных результатов:

- В кривых блеска обнаружены вариации рентгеновского излучения с периодами от 15 минут до 3,3 часов и долей пульсирующего излучения 0.2-0.5;
- В кривых блеска 7 рассмотренных звезд обнаружены до 200-300 быстрых вспышек продолжительностью до 45 секунд в кривых блеска с шагом 5 с и до 3 с в кривых с шагом 1 с;
- Подавляющее большинство (более 80%) всех обнаруженных быстрых вспышек являются сверхбыстрыми вспышками длительностью меньше 1 секунд;
- Обнаруженные вспышки составляют до 28% времени наблюдения и вклад мощности всех вспышек в полную мощность кривой блеска достигает 15%;
- Наибольшее число вспышек приходится на энергии до 2 кэВ;
- Не выявлено общей формы профиля обнаруженных вспышек; возможно, что сложные формы вспышечных событий объясняются наложением большого количества сверхбыстрых вспышек.

Общее заключение

Получены результаты в пользу гипотезы о взаимодействии магнитных полей диска и звезды типа γ Cas, возможно присутствие нетепловой компоненты в рентгеновских спектрах звезд, она может быть уровнем без вспышек. Быстрые вспышки, скорее всего, подобны солнечным нановспышкам, так как они преобладают на относительно низких энергиях до 2 кэВ.

Спасибо за внимание!

Спасибо за внимание!

Спасибо за внимание!

Спасибо за внимание!

Примеры модельных спектров аналогов γ Cas с покомпонентным разложением

