

Особенности переменности рентгеновского пульсара Her X-1 по данным наблюдений телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского



Ревнивцев В.М.^{1,2}, Постнов К.А.¹, Мольков С.В.², Шакура Н.И.¹,
Лутовинов А.А.², Лапшов И.Ю.², Ткаченко А.Ю.²

1 – Государственный Астрономический Институт им. П.К.Штернберга
2 – Институт Космических Исследований Российской Академии Наук



25-26 августа 2023 года были проведены наблюдения тесной двойной системы Her X-1 в момент включения рентгеновского источника во время 541 прецессионного цикла с помощью рентгеновского телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории Спектр-РГ.

На кривых блеска 4–12 и 12–25 кэВ (Рис. 1) четко прослеживается три стадии: (А) предзатменная часть, где нейтронная звезда закрыта от наблюдателя аккреционным диском; (В) затмение рентгеновского источника оптической звездой, где наблюдаемый рентгеновский поток достигает своего минимума; (С) послезатменная часть, где происходит открытие источника и наблюдается резкое увеличение рентгеновского потока. Эти стадии будут рассмотрены ниже подробнее.

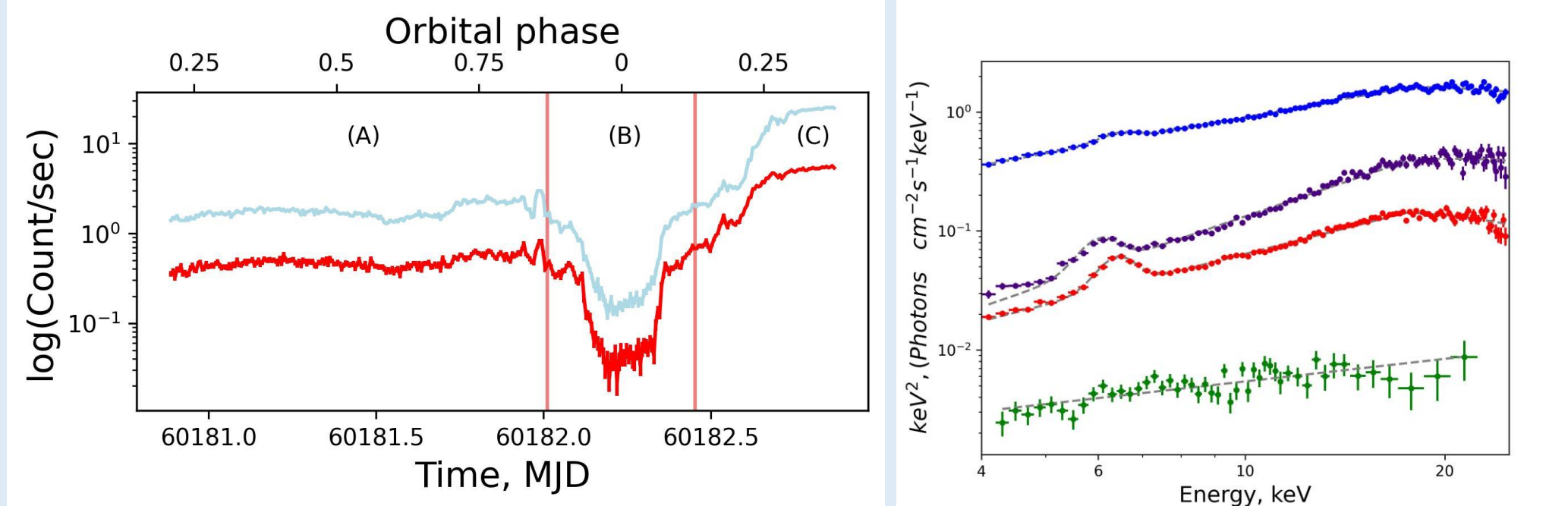


Рис. 1: (Слева) Кривые блеска Her X-1 в двух энергетических диапазонах (4–12 кэВ синим цветом и 12–25 кэВ красным цветом) с логарифмическим масштабом по оси Oy, где по оси Ox отложено время в MJD, а по оси Oy – скорость счета с bin = 500 сек. (Справа) Спектры из разных частей кривой блеска: красный – из начала наблюдений, до затмения; синий – из конца наблюдений, после затмения и зеленый – в центре затмения. В качестве модели для аппроксимации использовалась: $\text{highcut}(\text{powerlaw}) + \text{gaussian}$ из программы XSPEC. Фиолетовый спектр – единственный выбивающийся из общего перечня: он более жесткий и имеет дополнительную составляющую в мягкой части спектра, для аппроксимации которой в модель было добавлено чернотельное излучение.

Из спектрального анализа видно, что спектральные параметры слабо меняются вдоль кривой блеска. Так что общие особенности кривой блеска можно рассматривать на примере любого из диапазонов энергий.

Построена модель экспоненциального роста потока, регистрируемого при выходе рентгеновского источника из затмения оптической звездой. В модели, поток излучения от нейтронной звезды виден наблюдателю частично или полностью поглощаясь и рассеиваясь в короне аккреционного диска. Поглощение должно падать с ростом энергии излучения, а рассеяние – не меняться. Для аппроксимации кривой блеска использовалась формула без учета поглощения – только с учетом рассеяния:

$$F = (F_0 - F_d) * \exp\left[-A * \exp\left(-\frac{t - T_0}{b}\right)\right] + F_d$$
 где T_0 – начальное время (не фиксируется, так как не известен момент начала подъема), b – характерное время изменения потока, F_0 , F_d – параметры, описывающие вклад излучения нейтронной звезды и диска, соответственно.

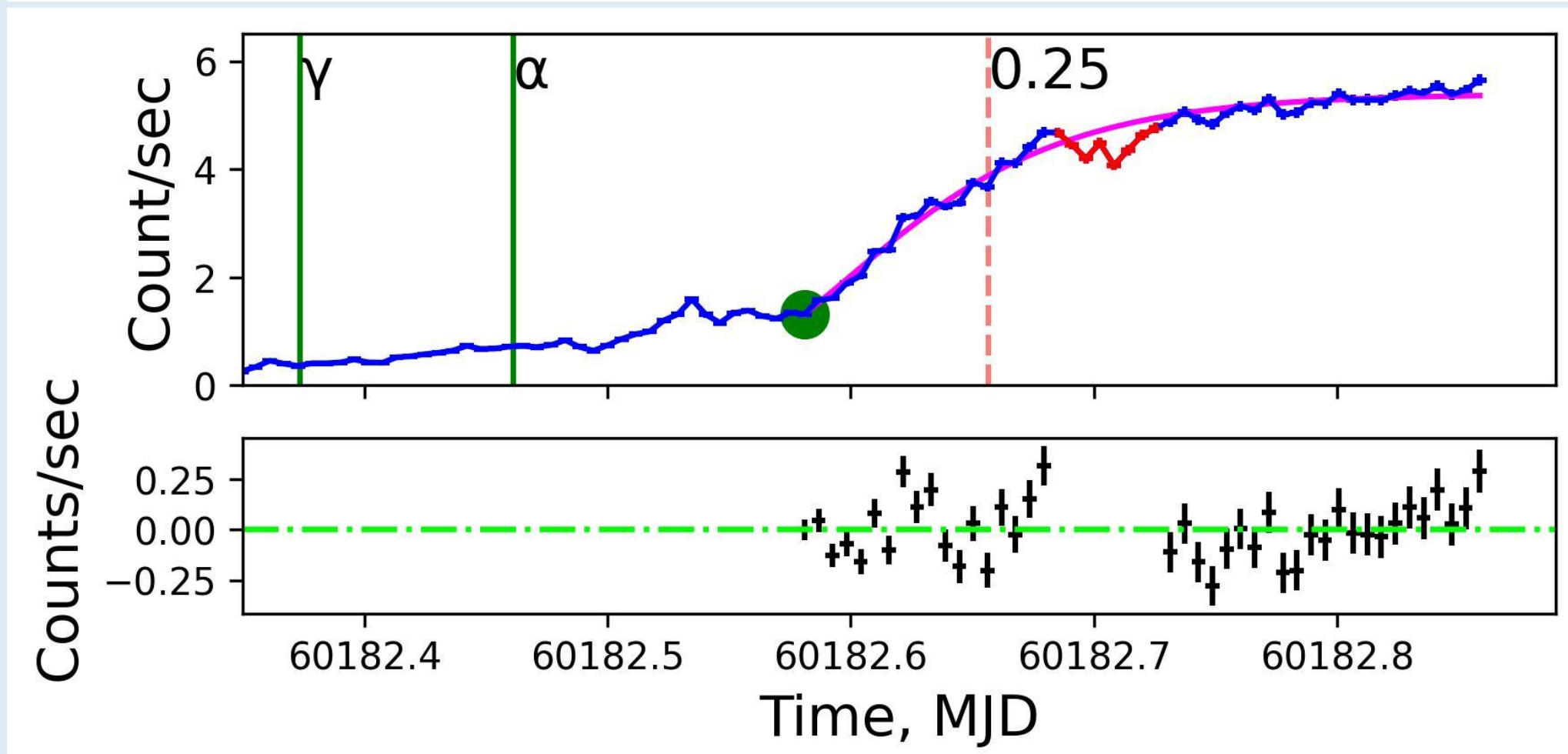
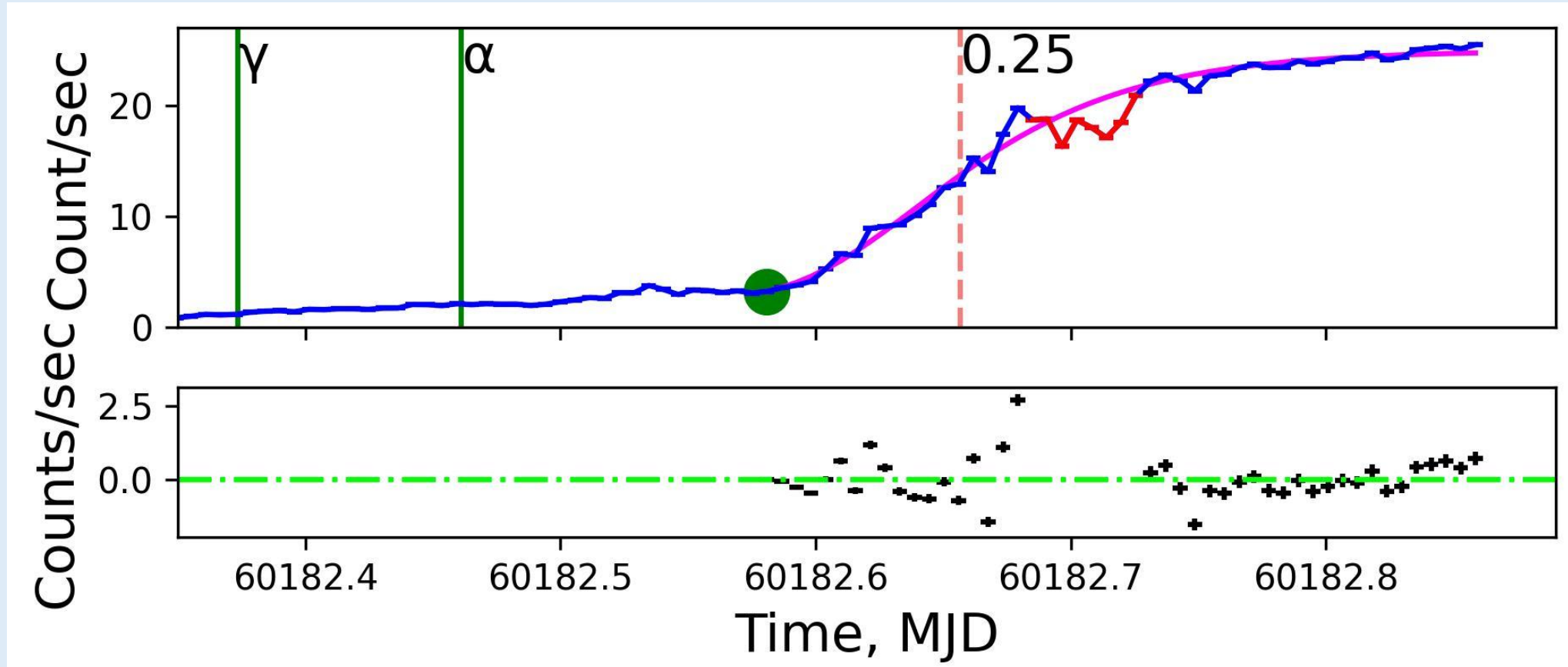


Рис. 3: Моделирование потока на экспоненциальном подъеме в диапазоне (сверху) 4–12 и (снизу) 12–25 кэВ. Темно-зеленая точка соответствует началу времени, красные точки выброшены из рассмотрения, так как соответствуют "дипам", вызванным попаданием неоднородной аккрецирующей струи на луч зрения, вертикальные зеленые линии α , γ – орбитальные фазы конца затмения аккреционного диска и затмения нейтронной звезды, розовая линия – наилучшая аппроксимация рассматриваемой модели.

Результаты:

1) Впервые обнаружена нутация наклонного изгибного аккреционного диска в системе Her X-1.

2) Определена орбитальная фаза открытия рентгеновского источника.

3) Построена модель экспоненциального увеличения потока в момент главного включения при открытии источника прецессирующим аккреционным диском.

В предзатменной части были обнаружены крупномасштабные колебания, вызванные нутацией наклонного аккреционного диска. Для описания поведения потока (до начала затмения) была использована следующая модель: $F = a * \sin(t * \omega_{nut} - \varphi) + (t - T_0) * k + b$, где t – время в данной точке, T_0 – время начала наблюдения (фиксированный параметр), ω_{nut} – частота нутации $\omega_{nut} = 2 * \omega_b - \omega_{pr}$, φ – фаза нутационных колебаний, a – амплитуда нутационных колебаний, b – значение функции в нулевой фазе колебаний, k – коэффициент наклона прецессионной составляющей.

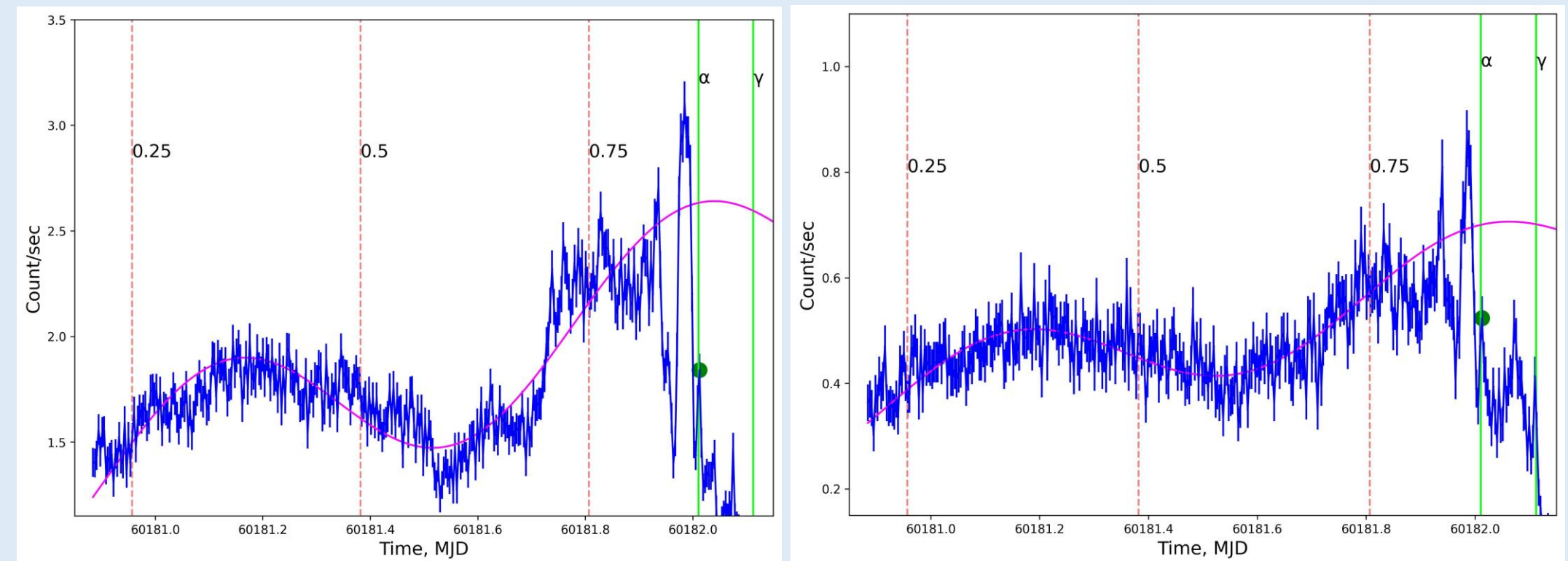


Рис. 2: Увеличенные предзатменные части кривых блеска в диапазонах (слева) 4–12 кэВ и (справа) 12–25 кэВ. Синяя кривая соответствует бинированию (bin = 300 сек), вертикальные красные линии – реперные орбитальные фазы, вертикальные зеленые линии α , γ – орбитальные фазы начала затмения аккреционного диска и затмения нейтронной звезды, розовая линия – наилучшая аппроксимация рассматриваемой модели.

Определена орбитальная фаза открытия источника – 0,25, что соответствует физической модели наклонного прецессирующего изгибного диска вокруг нейтронной звезды.

Синусоидальные профили появляются несколько ранее на фазе 0,75, но они сильно размыты из-за рассеяния излучения в короне диска и зависят от его геометрических параметров, что не позволяет назвать этот момент моментом включения.

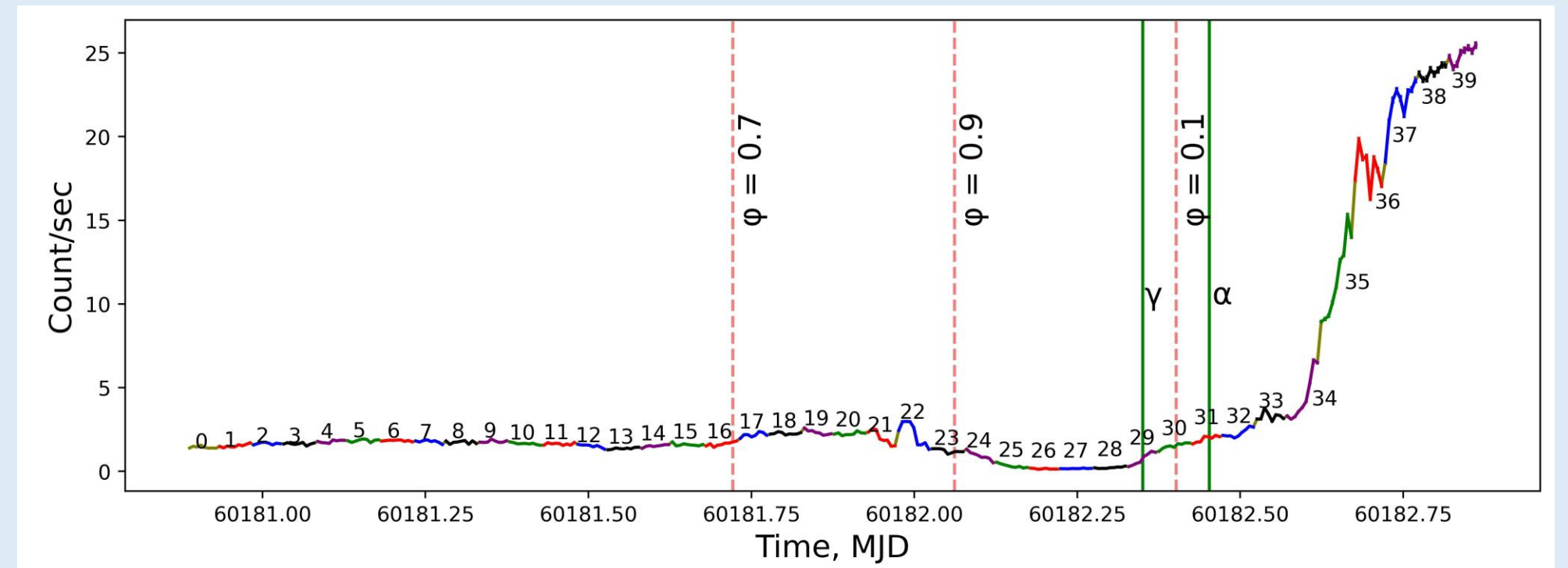


Рис. 4: Кривая блеска Her X-1 в диапазоне 4–12 кэВ, разделенная на равновременные отрезки, где зеленая линия γ соответствует фазе открытия источника оптической звездой.

Заметим, что не сглаженные профили в более жестком диапазоне энергий 12–25 кэВ появляются раньше чем в диапазоне 4–12 кэВ. Это может быть связано с тем, что в районе орбитальной фазы 0.2 (интервалы №33 и 34) регистрируемое пульсирующее излучение доходит отраженным. Альbedo растет с ростом энергии излучения, соответственно растет жесткость пульсирующего излучения. Поэтому выраженные профили в жестком диапазоне появляются раньше и также это можно связать с фиолетовым жестким спектром (Рис. 1), что попадает на тот же отрезок времени и выбивается своей жесткостью из общего перечня.

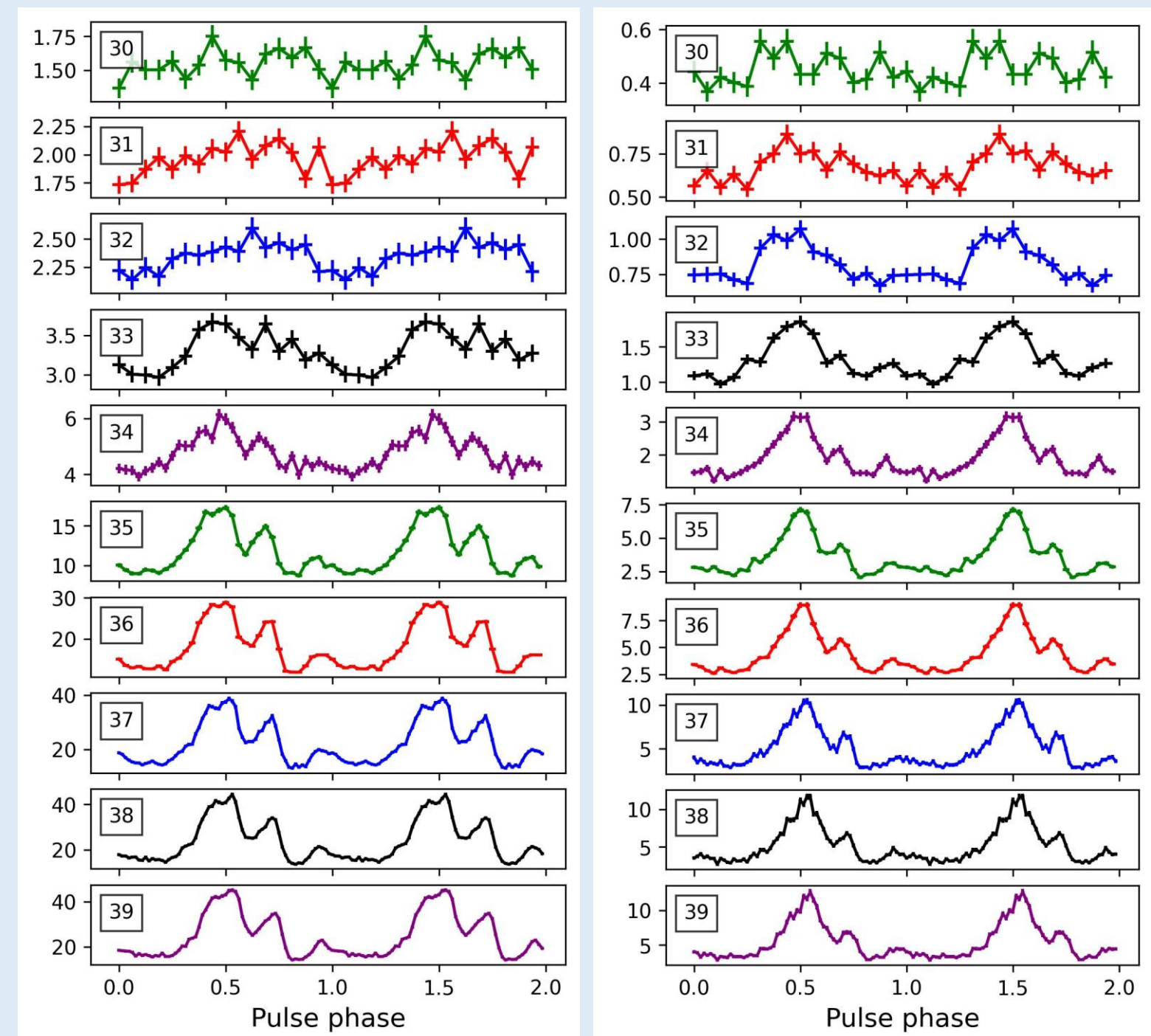


Рис. 5: Профили импульса в диапазоне энергий (слева) 4–12 и (справа) 12–25 кэВ.

Список литературы:

- 1) N. I. Shakura, N. A. Ketsaris, M. E. Prokhorov, and K. A. Postnov. *RXTE highlights of the 34.85-day cycle of HER X-1.*, 300(4):992–998, November 1998.
- 2) D. Klochov, N. Shakura, K. Postnov, R. Staubert, J. Wilms, and N. Ketsaris. *Observational evidence for a changing tilt of the accretion disk with respect to the orbital plane in Her X-1 over its 35 day cycle.* arXiv e-prints, pages astro-ph/0609276, September 2006.
- 3) R. Staubert, D. Klochov, and J. Wilms. *Updating the orbital ephemeris of Hercules X-1; rate of decay and eccentricity of the orbit.*, 500(2):883–889, June 2009.
- 4) K. Postnov, N. Shakura, R. Staubert, A. Kochetkova, D. Klochov, and J. Wilms. *Variable neutron star free precession in Hercules X-1 from evolution of RXTE X-ray pulse profiles with phase of the 35-d cycle.*, 435(2):1147–1164, October 2013.