

УДК 524.3

**С. А. Демин, О. Ю. Панищев, Ю. А. Нефедьев**

Астрономическая обсерватория им. В. П. Энгельгардта  
Казанского федерального университета  
ст. Обсерватория, Зеленодольский район, Татарстан, Российская Федерация, 422526  
star1955@yandex.ru

### **Динамические и спектральные особенности рентгеновского излучения микроквара ХТЕ J1550-564**

*Формализм функций памяти используется для исследования динамических и спектральных особенностей дискретных временных сигналов рентгеновской активности микроквара ХТЕ J1550-564 (в том числе количественное сопоставление времен затухания корреляций и статистической памяти). Регистрация динамики рентгеновского излучения осуществлялась орбитальной обсерваторией “Rossi X-Ray Timing Explorer”. На основе анализа временных и событийных корреляций обнаружен различимый характер релаксационных процессов и эффектов памяти в экви- и неэквидистантной динамике излучения ХТЕ J1550-564 в рентгеновском диапазоне. Описанный метод может использоваться для описания широкого круга астрофизических явлений и процессов, связанных с событийным представлением.*

*ДИНАМІЧНІ І СПЕКТРАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МІКРОКВАЗАРА ХТЕ J1550-564, Дьомін С. А., Панищев О. Ю., Нефедьев Ю. А. — Формалізм функцій пам'яті використовується для дослідження динамічних і спектральних особливостей дискретних часових сигналів рентгенівської активності мікроквара ХТЕ J1550-564 (в тому числі кількісне зіставлення часів загасання кореляцій і статистичної пам'яті). Реєстрація динаміки рентгенівського випромінювання здійснювалася орбітальною обсерваторією “Rossi X-ray Timing Explorer”. На основі аналізу тимчасових і подієвих кореляцій виявлено помітний характер релаксаційних процесів і ефектів пам'яті в екві- і нееквідистантній динаміці випромінювання ХТЕ J1550-564 в рентгенівському діапазоні. Описаний ме-*

*тод може використовуватися для опису широкого кола астрофізичних явищ і процесів, пов'язаних з подієвим поданням.*

*DYNAMICAL AND SPECTRAL X-RAY FEATURES OF THE MICRO-QUASAR XTE J1550-564, by Demin S. A., Panischev O. Yu., Nefedyeu Yu. A. — The formalism of memory functions was used to investigate the dynamic and spectral features (including a quantitative comparison of the times of correlation subside and statistical memory) of discrete time signals of X-ray activity of the microquasar XTE J1550-564. Observations of the X-ray emission dynamics were carried out from the board of the orbiting observatory Rossi X-Ray Timing Explorer. A distinguishable character of relaxation processes and memory effects in equi- and non-equidistant dynamics of the XTE J1550-564 X-ray emission was found from our analysis of temporal and event correlations. The procedure under consideration can be used for study a wide range of astrophysical phenomena and processes associated with the event-driven performance.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Исследование рентгеновской активности микроквazarов как сложных систем относится к актуальным проблемам астрофизики. Это обусловлено многочисленными практическими приложениями статистических методов анализа в астрономии. Многие уникальные свойства и особенности сложных систем живой и неживой природы были установлены благодаря математическим методам обработки экспериментальных данных. В то же время определенные трудности вызывает анализ долговременных корреляций — дальнего порядка взаимосвязей фиксируемых параметров, эффектов последствия (статистической памяти), конкуренции разномасштабных режимов — динамической перемежаемости и нестационарности, неэквидистантности во временном отношении, возникающих в силу природы исследуемых объектов. Кроме того, так как измерение параметров, характеризующих динамические состояния системы, осуществляется в определенные моменты времени, то набор величин, входящих в состав временной последовательности, оказывается дискретным. Это приводит к необходимости перехода при теоретическом описании сложных систем от непрерывных функций и интегро-дифференциальных уравнений к дискретным аналогам [3]. Весьма удачным аналитическим методом для описания временных корреляций, а также эффектов статистической памяти оказалась теория кинетических уравнений Цванцига и Мори [7, 8, 14].

В настоящей работе в рамках формализма функций памяти (ФФП) — дискретного обобщения уравнений Цванцига — Мори на случай анализа временных сигналов [12, 13], продуцируемых сложными системами, будет проведено исследование корреляций в динамике интен-

сивности рентгеновского излучения микроквазара ХТЕ J1550-564. Как известно, микроквазары представляют собой тесные двойные системы, состоящие из черной дыры или нейтронной звезды и оптической звезды-компаньона, для которых характерна струйная активность в виде джетов.

### ФОРМАЛИЗМ ФУНКЦИЙ ПАМЯТИ

Интенсивность рентгеновской активности микроквазара ХТЕ J1550-564 описывается временной последовательностью  $\{x_j\}$  величины  $X = \{x(T), x(T - \Delta t), \dots, x(T - (N - 1)\Delta t)\}$ . Здесь  $T$  — начальный момент регистрации,  $(N - 1)\Delta t$  — время регистрации сигнала,  $\Delta t$  — временной шаг дискретизации,  $x_j = x(T - j\Delta t)$  — значение  $X$  на  $j$ -м шаге, флуктуация определяется как  $x_j = x_j - \langle X \rangle$ . В работах [12, 13] было выведено аналитическое выражение цепочки взаимосвязанных конечно-разностных кинетических уравнений для дискретной временной корреляционной функции (ВКФ)  $a(t) = M_0(t)$  и функций памяти  $M_n(t)$ , где  $n = 1, 2, \dots$ :

$$\frac{M_{n+1}(t)}{\Delta t} = -\lambda_n M_{n+1}(t) + \sum_{j=0}^{m-1} M_n(j) M_{n+1}(t - j). \quad (1)$$

Нормированная ВКФ представлена в виде скалярного произведения

$$a(t) = \frac{\langle \mathbf{A}_k^0(0) \mathbf{A}_{m-k}^m(t) \rangle}{\langle |\mathbf{A}_k^0(0)|^2 \rangle}$$

векторов начального и текущего (в момент времени  $t$ ) состояний системы:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k^0(0) &= \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{k-1}\} = \\ &= \{x(T), x(T - \Delta t), x(T - 2\Delta t), \dots, x(T - (k-1)\Delta t)\}, \\ \mathbf{A}_{m-k}^m(t) &= \{x_m, x_{m-1}, x_{m-2}, \dots, x_{m-k+1}\} = \\ &= \{x(T - m\Delta t), x(T - (m-1)\Delta t), x(T - (m-2)\Delta t), \dots, \\ &\dots, x(T - (m-k+1)\Delta t)\}. \end{aligned}$$

Величины  $\lambda_n$  в соотношении (1) — кинетические параметры, описывающие спектр собственных значений квазиоператора Лиувилля  $\hat{L}_n$ ,  $\tau_n$  — релаксационные параметры с размерностью квадрата частоты:

$$\lambda_n = i \frac{\langle \mathbf{W}_n \hat{L}_n \mathbf{W}_n \rangle}{\langle |\mathbf{W}_n|^2 \rangle}, \quad (2)$$

$$\tau_n = \frac{\langle |\mathbf{W}_n|^2 \rangle}{\langle |\mathbf{W}_{n-1}|^2 \rangle}.$$

Нормированные дискретные функции памяти порядка  $n - 1$  определяются в виде

$$M_{n-1}(t) = \frac{\langle \mathbf{W}_{n-1} (1 - i \hat{L}_{n-1})^m \mathbf{W}_{n-1} \rangle}{\langle |\mathbf{W}_{n-1}|^2 \rangle}. \quad (3)$$

Динамические ортогональные переменные  $\mathbf{W}_n$  в уравнениях (2) и (3) получаются с помощью процедуры ортогонализации Грамма — Шмидта:

$$\langle \mathbf{W}_n, \mathbf{W}_m \rangle = \delta_{n,m} \langle |\mathbf{W}_n|^2 \rangle,$$

где  $\delta_{n,m}$  — символ Кронекера. Рекуррентная формула для определения множества новых ортогональных динамических переменных  $\mathbf{W}_n$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_0 &= \mathbf{A}_k^0(0), \quad \mathbf{W}_1 = (i\hat{L}_{-1})\mathbf{W}_0, \\ \mathbf{W}_2 &= (i\hat{L}_{-2})\mathbf{W}_1 - \langle \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_0 \rangle \mathbf{W}_0, \dots, \\ \mathbf{W}_n &= (i\hat{L}_{-n})\mathbf{W}_{n-1} - \langle \mathbf{W}_n, \mathbf{W}_{n-2} \rangle \mathbf{W}_{n-2} - \dots \end{aligned} \quad (4)$$

С более подробным описанием математического аппарата ФФП, используемого для анализа равноинтервальных временных сигналов, можно познакомиться в работах [12, 13]. Обобщение ФФП на случай анализа неэквидистантных во времени сигналов, генерируемых сложными астрофизическими системами, представлено в работах [2, 11].

С физической точки зрения временные масштабы процессов, связанные с корреляциями и эффектами памяти, не могут быть произвольными. Поэтому для количественного сопоставления и сравнения этих процессов используются различные статистические показатели. Одна из мер памяти  $\gamma_i(\omega)$  для частотно-зависимого случая была представлена в работах [2, 11—13]:

$$\gamma_i(\omega) = \frac{\gamma_{i-1}(\omega)}{\gamma_i(\omega)}^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь  $\gamma_i(\omega)$  представляет собой спектр мощности соответствующей функции памяти  $i$ -го порядка  $M_i(t)$ :

$$\gamma_i(\omega) = \sum_{j=0}^{N-1} M_i(t_j) \cos(2\omega t_j). \quad (6)$$

Дальнейшие исследования эффектов статистической памяти в динамике сложных систем привели к новой мере памяти [6]:

$$\gamma_i(\omega) = \frac{\tilde{M}_{i-1}(\omega)}{\tilde{M}_i(\omega)}, \quad (7)$$

где  $\tilde{M}_i(\omega) = dM_i/d\omega$ ,  $\tilde{M}_i(\omega)$  — фурье-образ функции памяти порядка  $i$ . Набор частотных зависимостей (7) используется для количественной оценки скорости потери корреляционных связей на соответствующих релаксационных уровнях. Отметим, что расчет значений (5)—(7) для

неравномерных временных сигналов представлен в работах [2, 11].

Предложенные меры памяти  $\tau = \tau_1(0)$ ,  $\tau = \tau_1(0)$  позволят установить уровень проявления эффектов статистической памяти в долговременной составляющей временных сигналов рентгеновского излучения микроквazarов. Если  $\tau \gg 1$  или  $\tau \gg 1$ , рассматриваемый стохастический процесс является марковским (случайным). В этом случае время жизни памяти в системе намного короче, чем время релаксации исходной ВКФ. Эволюция системы характеризуется слабой (короткой) статистической памятью. В пределе  $\tau \rightarrow 0$  или  $\tau \rightarrow 0$  процесс описывается дельтаобразной памятью. Уменьшение параметров характеризует увеличение времени жизни памяти. В случае  $\tau \ll 1$  или  $\tau \ll 1$  процесс характеризуется долговременной (сильной) статистической памятью. Тогда время жизни памяти соизмеримо со временем релаксации исходной ВКФ. При  $\tau > 1$  или  $\tau > 1$  исследуемый процесс можно рассматривать как квазимарковский с умеренной статистической памятью.

#### ОСОБЕННОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОКВАЗАРА ХТЕ J1550-564

Регистрация рентгеновской активности ХТЕ J1550-564 осуществлялась обзорной камерой All-Sky Monitor (ASM) орбитальной рентгеновской обсерватории “Rossi X-Ray Timing Explorer” (RXTE) [5, <http://URL:xte.mit.edu>] в интервале времени с 01.01.1996 г. по 01.01.2006 г. Экспериментальные данные представляют собой экспонированные значения 90-с наблюдений полного потока рентгеновского излучения  $S$  (1.5—12 кэВ) в собственных единицах ASM. Полный поток излучения Крабовидной туманности в диапазоне 2—10 кэВ приблизительно соответствует  $75 \text{ с}^{-1}$ .

Рентгеновская новая ХТЕ J1550-564, расстояние до которой 5.3 кпк [9], была открыта 7 сентября 1998 г. при помощи обзорной камеры ASM спутника RXTE. Наиболее вероятным оптическим компонентом источника считается звезда блеска  $V = 16.7^m - 0.1^m$  с широкими и яркими эмиссионными линиями (H, H, He II). Масса этой звезды приблизительно равна массе Солнца, а масса компактного объекта оценивается в  $9.4 M_{\odot}$  [4]. Микроквazar ХТЕ J1550-564 является мягким рентгеновским транзиентом с интенсивностью около 70 мКраб (1.5—12 кэВ). Его координаты  $\alpha = 15^h 50^m 41^s$ ,  $\delta = -56^{\circ} 27' 06''$ .

На рис. 1 представлены исходные временные серии полного потока рентгеновского излучения микроквзара ХТЕ J1550-564, фиксируемые в мягкой области рентгеновского спектра (1.5—12 кэВ). На рис. 1, а приведена эквидистантная, посуточно усредненная временная серия в модифицированной юлианской шкале, состоящая из 3644 точек. Рис. 1, б содержит всю выборку из 23735 значений, накопленных камерой за указанный период (нумерация ведется по номерам  $n$

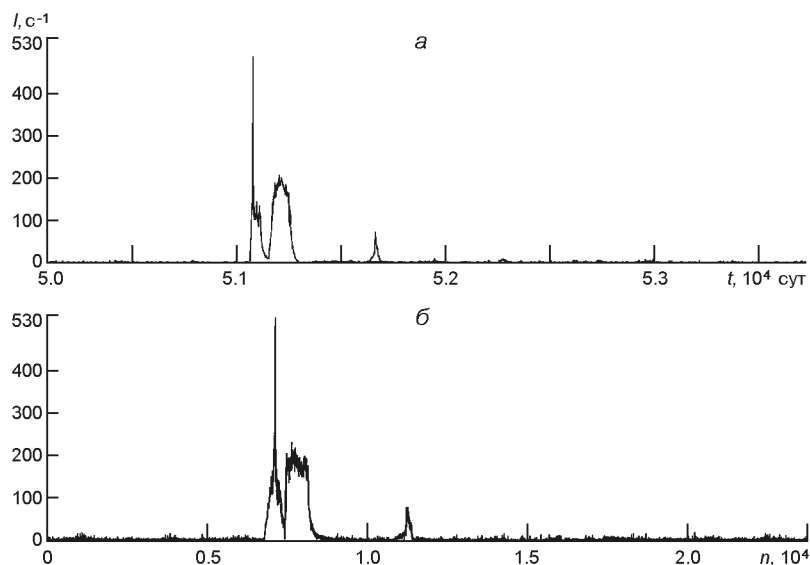


Рис. 1. Полный поток рентгеновского излучения микроквазара XTE J1550-564 в энергетическом диапазоне от 1.5 до 12 кэВ в собственных единицах обзорной камеры ASM в секунду: *a* — посуточно усредненный поток в шкале времени MJD, *б* — исходная последовательность в шкале событий ( $n$  — номер события)

событий). Средний интервал между событиями составляет 221 мин ( $[10 \text{ лет } 365 \text{ сут } 24 \text{ ч } 60 \text{ мин}]/23735$ ). На графиках видны узкий пик первого максимума, приходящийся на 20 сентября 1998 г. и менее интенсивный, но более широкий вторичный максимум. Как отмечено в работе [1], во время первой вспышки (1998—1999 гг.) источник наблюдался в сверхвысоком и высоком/мягком спектральных состояниях и продемонстрировал М-образную кривую блеска не только в стандартном, но и в широком (2—200 кэВ) рентгеновском диапазоне. В первой фазе вспышки преобладала степенная составляющая, формирующаяся в горячей короне, тогда как во второй фазе значительно больший вклад вносило излучение от диска. Кривая блеска второй вспышки (2000 г.) была существенно проще: в начальной и финальной фазах, когда поток от XTE J1550-564 в стандартном рентгеновском диапазоне был низким, источник находился в жестком спектральном состоянии. В максимуме вспышки источник перешел в промежуточное состояние, в котором наблюдался заметный вклад от излучения аккреционного диска. В дальнейшем вспышки данного объекта фиксировались в 2001, 2002 и 2003 гг.

Экспериментальная серия в первоначальном виде представляет последовательность временных вариаций интенсивности рентгеновского излучения со случайным шагом дискретизации. Этот тип данных обозначим цифрой II, а последовательность данных с суточным усреднением обозначим цифрой I.

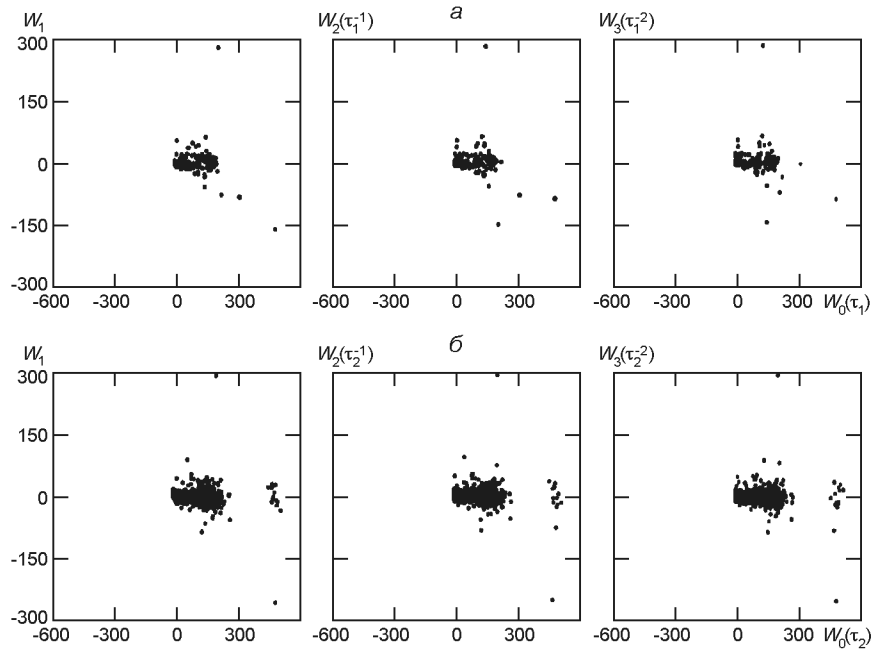
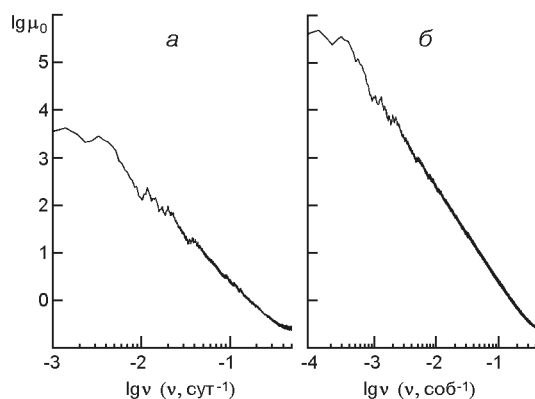


Рис. 2. Плоские проекции фазовых портретов зависимостей динамических переменных  $W_i = f(W_0)$ , где  $i = 1..3$ , для рентгеновского излучения микроквазара ХТЕ J1550-564: *a* — представление в шкале времени (шаг дискретизации  $\tau_1 = 1$  сут), *б* — представление в шкале событий (шаг дискретизации  $\tau_2 = 1$  соб)

Плоские проекции фазовых портретов трех ортогональных динамических переменных  $W_{1..3} = f(W_0)$  представлены на рис. 2. Фазовые портреты, построенные для эквидистантной динамики рентгеновской активности микроквазара ХТЕ J1550-564 (рис. 2, *a*), имеют симметричное относительно начала координат ядро. В то же время для данных II типа (рис. 2, *б*) наблюдается расслоение пространственно-временной структуры фазового портрета. Усиление интенсивности рентгеновской активности на отдельных участках кривой блеска определяет образование отделяющихся фазовых облаков. Отметим, что в привычном понимании фазовые портреты представляют собой диаграммы значений сигнала в разные моменты времени. В нашей работе зависимость  $W_0(t)$  определяется флуктуациями значений регистрируемого параметра (см. соотношение (4) и выражение для вектора начального состояния системы). Величины  $W_i(t)$  получены на основе метода конечных разностей как «производные» от  $W_0(t)$ . Тогда координаты фазовых точек определяются значениями соответствующих временных последовательностей  $W_{0..3}(t)$ . В случае неравномерного сигнала строятся «событийные» зависимости  $W_i(n)$ , где  $n$  определяет индекс события — значения регистрируемого параметра на  $n$ -м шаге.

На рис. 3 приведены спектры мощности  $S_0(\omega)$  исходных ВКФ и событийной корреляционной функции (СКФ) для динамики полного потока рентгеновского излучения ХТЕ J1550-564 (для расчета спект-

Рис. 3. Спектры мощности временной (а) и событийной (б) корреляционных функций для динамики полного потока рентгеновского излучения микрокварара ХТЕ J1550-564



ров мощности используется соотношение (6)). Графики представлены в дважды логарифмическом масштабе. На спектрах наблюдаются степенные зависимости:  $\mu_0(\nu)$  с показателями  $\alpha = 1.74$  и  $1.79$  для данных I и II типов соответственно. Спектры имеют самоподобный осциллирующий характер: более низкочастотный и менее амплитудный в случае данных I типа. В работе [10] отмечено, что подобный наклон спектров мощности порядка 1.8 наблюдается для катаклизмических переменных звезд, например для ТТ Овна. Амплитудные значения в спектрах мощности для двух типов данных различаются на два порядка, что связано со структурой неравномерного сигнала. В нем представлены периодические процессы, которые оказываются неразличимыми при анализе суточно усредненной последовательности данных.

На рис. 4, а, б представлена частотная зависимость меры памяти  $\mu_1(\nu)$  для временной и событийной последовательностей вариаций потока рентгеновского излучения ХТЕ J1550-564. На графиках наблюдается значительное ослабление эффектов статистической памяти при переходе от равномерной серии  $\mu_1^I(0) = 45.69$  к событийной  $\mu_1^{II}(0) = 219.83$ . Усреднение данных приводит к сглаживанию флуктуационных разбросов и появлению «излишней» регулярности. Напротив, данные II типа указывают на малые времена затухания корреляций, что позволяет сделать предположение о существенной неоднородности внутренних областей аккреционного диска, преимущественно генерирующих рентгеновское излучение.

Осцилляционный характер рентгеновской активности ХТЕ J1550-564 обнаруживается и в частотной зависимости  $\mu_1(\nu)$ . Совокупность периодических процессов разной частоты свидетельствует о достаточно сложной конкуренции мелкомасштабных флуктуаций в событийной последовательности рентгеновской активности — сильной переменности на коротких временных интервалах (вплоть до миллисекунд). В то же время доминирование по интенсивности низкочастотных пиков определяет долговременное самоподобие в процессах переноса вещества — достаточно медленную дисковую аккрецию (рис. 4, в, г). Возможно, после первой вспышки (1998—1999 гг.) плот-



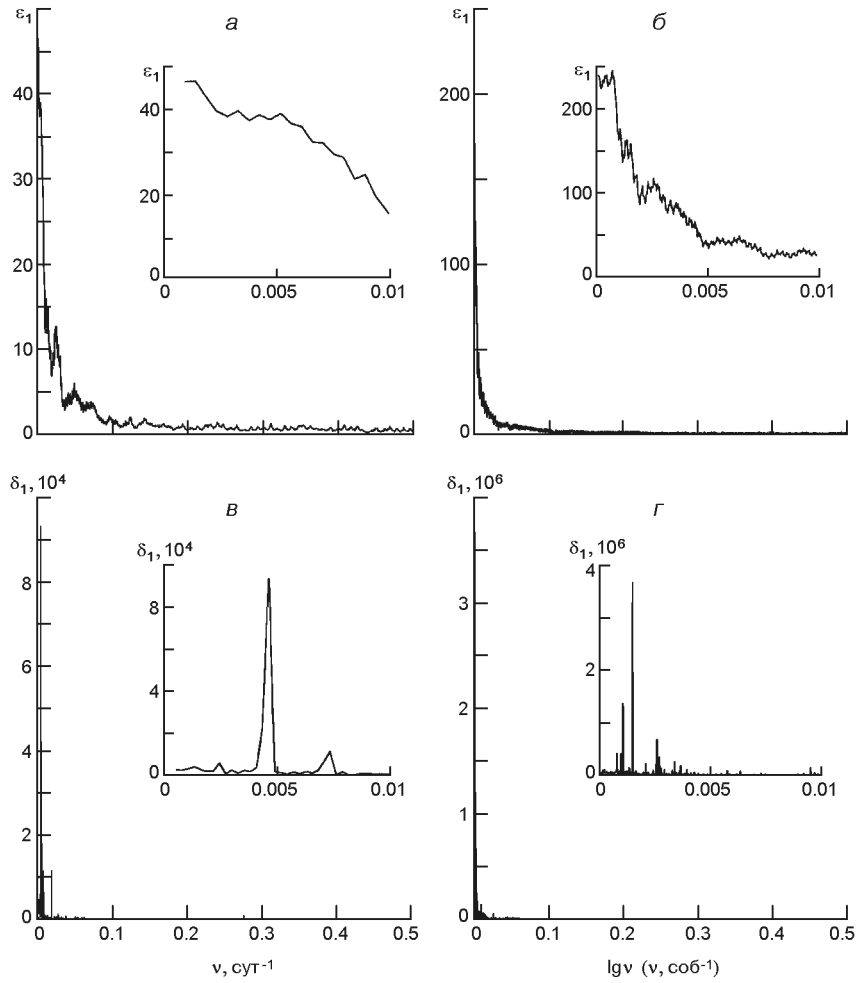


Рис. 4. Частотные зависимости  $\varepsilon_1(\nu)$  и  $\delta_1(\nu)$  для временного (а, в) и событийного (б, г) представлений интенсивности рентгеновского излучения микроквара XTE J1550-564 (на вставках — низкочастотная область)

ность аккреционного диска источника стала меньше, темп аккреции снизился. Низкая подпитка источника за счет аккреционного диска привела к вспышкам меньшей интенсивности. Значения параметров  $\delta_1(0) = 2502.3$  и  $48483$  для данных I и II типов соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлены некоторые динамические и спектральные особенности рентгеновской активности микроквара XTE J1550-564. В частности, малые времена затухания корреляций (слабая статистическая память) позволяют предположить о существенной неоднородности внутренних, генерирующих рентгеновское излучение, областей аккреционного диска двойной системы XTE J1550-564. В спектрах

мощности корреляционных функций и частотных зависимостях мер памяти выявлены периодические процессы разной длительности и интенсивности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-97000-а.

1. Александрович Н. Л., Арефьев В. А. Мягкие рентгеновские новые, кандидаты в черные дыры XTE J2012 + 381 и XTE J1550-564 // Письма в Астрон. журн.—2002.—**28**, № 10.—С. 732—740.
2. Дёмин С. А., Юльметьев Р. М., Панищев О. Ю. и др. Нелинейная стохастическая динамика событийных корреляций в астрофизических объектах // Нелинейный мир.—2008.—**6**, № 10.—С. 560—578.
3. Хармут Х. Применение методов теории информации в физике. — М.: Мир, 1989.—344 с.
4. Castro-Tirado A. J., Duerbeck H.W., Hook I., Yan L. XTE J1550-564 // IAU Circ. 1998.—N 7013.
5. Levine A. M., Bradt H., Cui W., et al. First results from the all-sky monitor on the Rossi X-ray timing explorer // Astrophys. J.—1996.—**469**, N 1.—P. L33—L36.
6. Mokshin A. V., Yulmetyev R. M., Hanggi P. Simple measure of memory for dynamical processes described by the generalized Langevin equation // Phys. Rev. Lett.—2005.—**95**.—P. 200601(1)—200601(4).
7. Mori H. Transport, collective motion, and Brownian motion // Prog. Theor. Phys.—1965.—**33**, N 3.—P. 423—455.
8. Mori H. A. Continued-fraction representation of the time-correlation functions // Prog. Theor. Phys.—1965.—**34**, N 3.—P. 399—416.
9. Orosz J. A., Groot P. J., van der Klis M., et al. Dynamical evidence for a black hole in the microquasar XTE J1550-564 // Astrophys. J.—2002.—**568**.—P. 845—861.
10. Tremko J., Andronov I. L., Chinarova L. L., et al. Periodic and aperiodic variations in TT Arietis. Results from an international campaign // Astron. and Astrophys.—1996.—**312**.—P. 121—134.
11. Yulmetyev R. M., Demin S. A., Khusnutdinov R. M., et al. Non-Markov statistical effects of X-ray emission intensity of the microquasar GRS 1915 + 105 // Nonlinear Phenomena in Complex Systems.—2006.—**9**, N 4.—P. 313—330.
12. Yulmetyev R. M., Hanggi P., Gafarov F. M. Stochastic dynamics of time correlation in complex systems with discrete time // Phys. Rev. E.—2000.—**62**.—P. 6178—6194.
13. Yulmetyev R. M., Hanggi P., Gafarov F. Quantification of heart rate variability by discrete nonstationary non-Markov stochastic processes // Phys. Rev. E.—2002.—**65**.—P. 046107-1—046107-15.
14. Zwanzig R. Nonequilibrium statistical mechanics. New York: Oxford University Press, 2001.—222 p.

Статья поступила в редакцию 26.02.13