

И.И. ГОРБАНЬ

СТАТИСТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Анотація. У рентгенівському діапазоні частот досліджено порушення статистичної стійкості випромінювання трьох астрофізичних об'єктів: GRS 1915+105, Cygnus X-1 і PSRJ 1012+5307. Результати дослідження вказують, що випромінювання джерела GRS 1915+105 носить статистично стійкий характер на протязі приблизно місяця, Cygnus X-1 – на протязі тижня, а пульсара PSR J1012+5307 – на протязі не менш як півтора десятка років.

Ключові слова: статистична стійкість, параметр статистичної нестійкості, пульсар PSR J1012+5307, GRS 1915+105, Cygnus X-1.

Аннотация. В рентгеновском диапазоне частот исследованы нарушения статистической устойчивости излучения трех астрофизических объектов: GRS 1915+105, Cygnus X-1 и PSRJ 1012+5307. Результаты исследования указывают, что излучение источника GRS 1915+105 носит статистически устойчивый характер на протяжении примерно месяца, Cygnus X-1 – на протяжении недели, а пульсара PSR J1012+5307 – на протяжении не менее полутора десятка лет.

Ключевые слова: статистическая устойчивость, параметр статистической неустойчивости, пульсар PSR J1012+5307, GRS 1915+105, Cygnus X-1.

Abstract. Failure in statistical radiation stability of three astrophysical objects (GRS 1915+105, Cygnus X-1, and PSRJ 1012+5307) is researched in X-ray range. Research shows that radiation of GRS 1915+105 source has statistical stable character for near a month, Cygnus X-1 – for a week, and PSR J1012+5307 pulsar – for 15 years at least.

Keywords: statistical stability, parameter of statistical instability, pulsar PSR J1012+5307, GRS 1915+105, Cygnus X-1.

1. Введение

Одним из удивительных физических явлений окружающего мира является феномен статистической устойчивости частоты массовых событий. Долгое время считалось, что при неограниченном увеличении объема выборки частота любого такого события стремится к фиксированной величине, которую принято ассоциировать с его вероятностью.

В результате исследований на больших интервалах наблюдения статистической устойчивости процессов различной физической природы было установлено, что феномен статистической устойчивости носит неидеальный характер: вначале с увеличением объема выборки дисперсия флуктуации выборочного среднего уменьшается, но затем, достигнув определенного значения, практически перестает меняться, а в некоторых случаях даже растет. Этот вывод был сделан на основе анализа колебаний напряжения городской сети, магнитного поля Земли, курса валют, высоты и периода морских волн, температуры воздуха и количества осадков, температуры воды в Тихом океане и др. [1–5].

Было высказано предположение [1], что эффект нарушения статистической устойчивости присущ всем реальным физическим явлениям. Исключения могут составлять, возможно, лишь фундаментальные физические постоянные, такие как скорость света, гравитационные постоянные и пр., рассматриваемые современной наукой как мировые константы.

Хотя многие результаты исследований указывают в целом на ограниченный характер феномена статистической устойчивости частоты, возникает вопрос: только ли фундаментальные физические константы могут претендовать на роль идеально статистически

устойчивых явлений? Возможно, существуют физические процессы, неотличимые от идеально статистически устойчивых.

Косвенным указанием, что такие процессы могут существовать в природе, служат результаты анализа статистической устойчивости колебаний количества осадков на протяжении десятков лет наблюдения в разных городах [6], свидетельствующие о высокой степени их стабильности. Хотя кривые параметров статистической неустойчивости этих колебаний в некоторых случаях выходят за среднеквадратический интервал отклонения от кривых, соответствующих идеально устойчивому процессу, однако всегда оказываются очень близкими к ним.

Если искомые статистически устойчивые процессы существуют, то искать их надо, прежде всего, среди источников космического излучения, некоторые из которых, как известно, отличаются высокой стабильностью параметров.

Целью настоящей статьи является изучение в рентгеновском диапазоне частот нарушений статистической устойчивости излучения астрофизических объектов разного типа.

2. Объекты исследования

Исследованию были подвергнуты потоки рентгеновского излучения от трех астрофизических аккрецирующих источников рентгеновского излучения: GRS 1915+105, Cygnus X-1 и PSRJ 1012+5307. Данные для исследования взяты с сайта [7]. Измерения интенсивности U проводились в период с 1 января 1996 г. по 31 декабря 2011 г. Средняя периодичность измерений составляла 2,7 ч для GRS 1915+105, 3 ч для Cygnus X-1 и 2,8 ч для PSRJ 1012+5307.

Система GRS 1915+105 представляет собой звезду-донор с массой $M_d = (1,2 \pm 0,2)M_\odot$, вращающуюся с периодом 33,5 суток вокруг быстро вращающейся черной дыры с массой $M_b = (14 \pm 4)M_\odot$ [8, 9], где M_\odot – масса Солнца. Излучение этой системы сопровождается мощными рентгеновскими вспышками. Система GRS 1915+105 рассматривается как звездный аналог активных ядер галактик, черпающих энергию из сверхтяжелых черных дыр.

Система Cygnus X-1 состоит из [8, 10] сверхгиганта массой $M_d = (33 \pm 9)M_\odot$, наблюдаемого в оптической части спектра, и черной дыры массой $M_b = (16 \pm 5)M_\odot$. Рентгеновское излучение генерируется во внутренних слоях плоского газового диска, образованного в результате перетекания вещества от сверхгиганта в черную дыру.

Источник PSR J1012+5307 представляет собой пульсар.

3. Методика оценки нарушений статистической устойчивости

По определению [1], последовательность X_1, X_2, \dots случайных величин (случайная выборка) считается статистически устойчивой (статистически стабильной), если при устремлении объема выборки N к бесконечности математическое ожидание выборочной дисперсии

$$\bar{D}_{Y_N} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (Y_n - \bar{m}_{Y_N})^2$$

флуктуации выборочного среднего

$$Y_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (n = \overline{1, N})$$

стремится к нулю, где $\bar{m}_{\gamma_N} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_n$ – выборочное среднее флуктуации среднего.

Последовательности, не удовлетворяющие этому условию, статистически неустойчивы.

Оценка статистической устойчивости проводилась по разработанной в работах [1, 11] методике, основанной на расчете параметров, характеризующих нарушение устойчивости на конечном интервале наблюдения. Использовались параметр γ_N , представляющий собой математическое ожидание выборочной дисперсии \bar{D}_{γ_N} , нормированной на оценку дисперсии выборочного среднего $D_{\gamma_N} = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N D_{x_n}$, и объем выборки N , где D_{x_n} – оценка дисперсии случайной величины X_n , а также два производных параметра:

$$h_N = \gamma_N / \gamma_{0N}$$

и

$$\mu_N = \sqrt{\gamma_N / (1 + \gamma_N)},$$

где γ_{0N} – единица измерения параметра γ_N , представляющая собой параметр γ_N , соответствующий идеальной статистически устойчивой последовательности N некоррелированных гауссовских отсчетов с постоянной дисперсией $D_{x_n} = D_x$ и нулевым математическим ожиданием.

Оценка γ_N^* параметра γ_N вычислялась по формуле $\gamma_N^* = \frac{\bar{D}_{\gamma_N}}{D_{x_N}}$, где $\bar{D}_{x_N} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N D_x^*(n)$ – среднее оценок дисперсии $D_x^*(n)$, сформированное по отдельным фрагментам реализации последовательности X_n ($n = \overline{1, N}$). Оценки же h_N^* , μ_N^* параметров h_N , μ_N рассчитывались при наличии оценки γ_N^* по формулам $h_N^* = \gamma_N^* / \gamma_{0N}$, $\mu_N^* = \sqrt{\gamma_N^* / (1 + \gamma_N^*)}$.

Значения параметров γ_N , h_N (и γ_N^* , h_N^*) ограничены интервалом $[0, \infty)$, а параметра μ_N (и μ_N^*) – интервалом $[0, 1)$.

Факт нарушения устойчивости процесса устанавливался по тенденции изменения параметров γ_N^* , h_N^* и μ_N^* при больших значениях N . Процесс считался устойчивым, если наблюдалось стремление значений параметров γ_N^* , μ_N^* к нулю или параметра h_N^* к единице.

4. Результаты оценки нарушений статистической устойчивости

По данным измерений интенсивности излучения исследуемых источников в рентгеновском диапазоне частот были рассчитаны характеристики, представленные на рис. 1–3.

Сплошными линиями на рис. 1а, 2а и 3а изображены зависимости интенсивности излучения от времени t соответственно источников GRS 1915+105, Cygnus X-1 и PSR J1012+5307, на рис. 1б, 2б и 3б – изменения во времени выборочных средних этих источников, на рис. 1в, 2в, 3в – зависимости от времени параметра γ_N^* , на рис. 1г, 2г, 3г – зави-

симости от времени параметра μ_N^* , на рис. 1д, 2д, 3д – зависимости от времени параметра h_N^* , а на рис. 1е, 2е, 3е – спектральные плотности мощности (СПМ) излучения этих источников. Пунктирными линиями на рис. 1в, 2в, 3в, а также 1г, 2г, 3г и 1д, 2д, 3д изображены соответственно параметры γ_N , h_N и μ_N для идеального устойчивого процесса, а точечными линиями – среднеквадратические отклонения от них. Пунктирными линиями на рис. 1е, 2е, 3е представлены СПМ, описываемые степенными зависимостями $S(f) \sim \frac{1}{f^\beta}$, где $\beta = \overline{1,4}$.

Интерес к спектрам и, в частности, описываемым степенными зависимостями, вызван тем, что, как установлено в работе [12], статистическая устойчивость определяется исключительно спектром процесса. При этом статистически устойчивыми являются процессы, СПМ которых описывается степенной функцией с параметром $\beta < 1$. Процессы же с СПМ, представляющей собой степенную функцию с параметром $\beta \geq 1$, статистически неустойчивы.

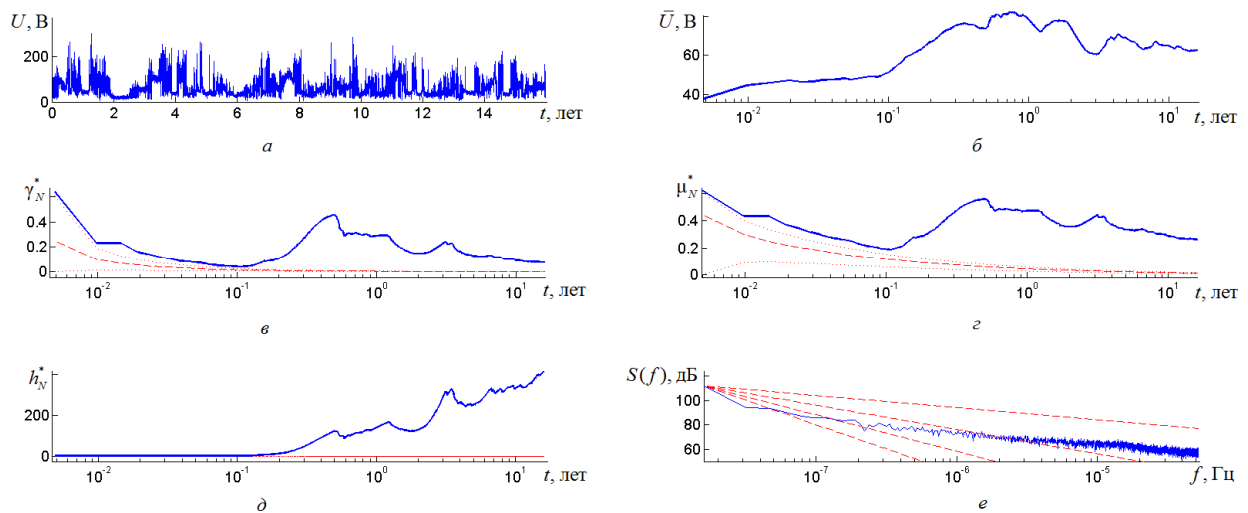


Рис. 1. Характеристики источника GRS 1915+105

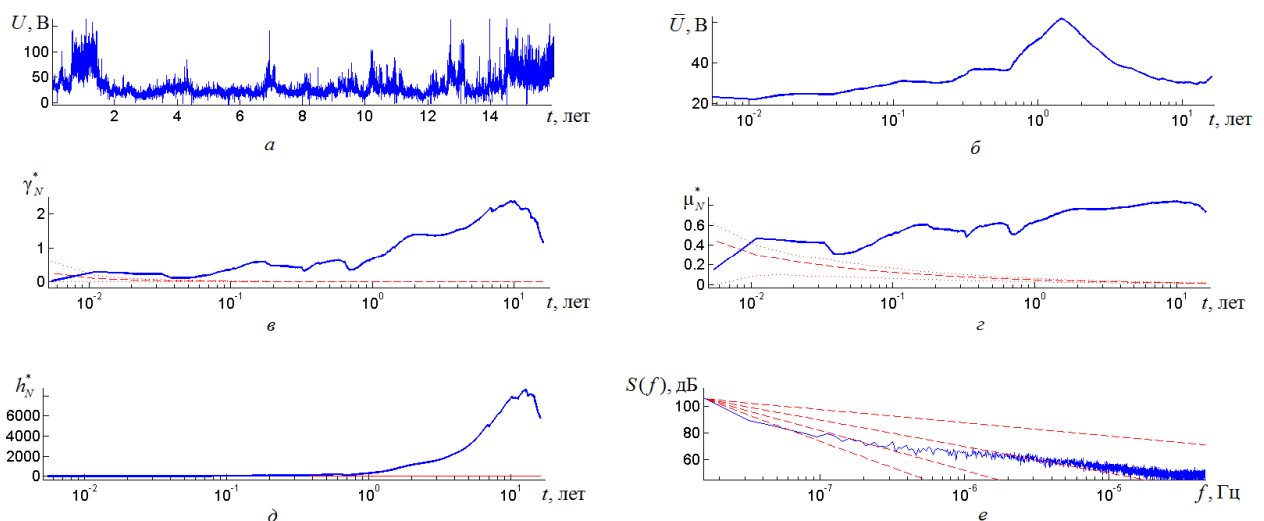


Рис. 2. Характеристики источника Cygnus X-1

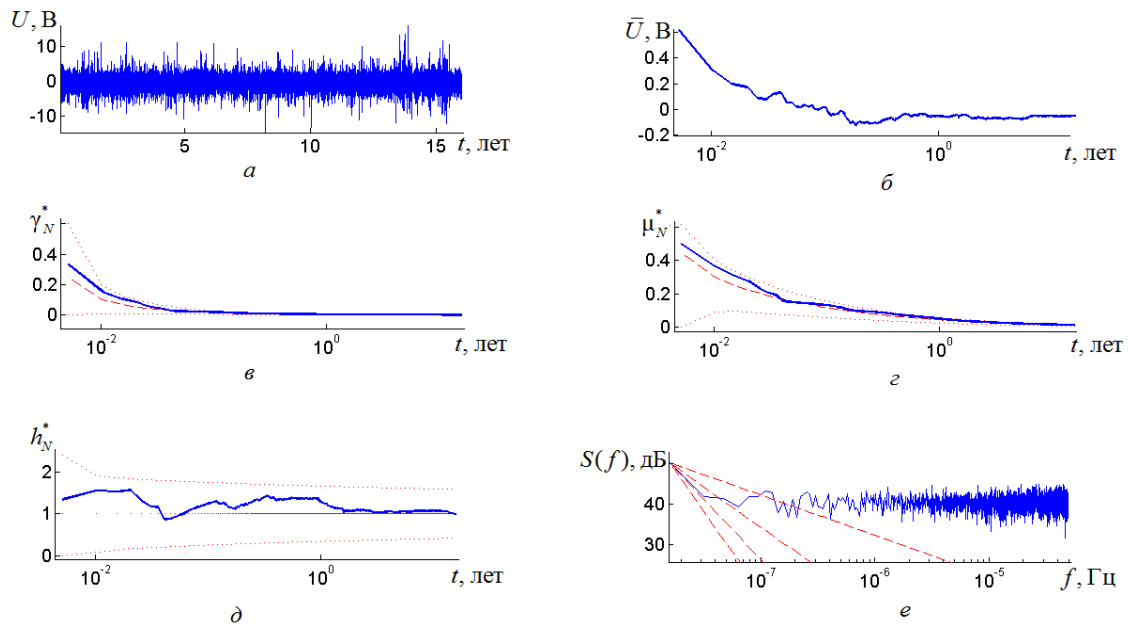


Рис. 3. Характеристики пульсара PSR J1012+5307

Сравнение однотипных кривых на рис. 1–3 показывает, что характеристики источников GRS 1915+105 и Cygnus X-1 в целом похожи. Характеристики же пульсара PSR J1012+5307 существенно отличаются.

Динамика изменения параметров статистической неустойчивости γ_N^* , h_N^* и μ_N^* указывает на то, что излучение источника GRS 1915+105 носит статистически устойчивый характер на протяжении примерно месяца, источника Cygnus X-1 – на протяжении недели, а пульсара PSR J1012+5307 – на протяжении не менее полутора десятка лет.

Параметры статистической неустойчивости излучения пульсара и его СПМ практически совпадают с аналогичными характеристиками идеального статистически устойчивого источника излучения.

Полученные результаты свидетельствуют, что в окружающем мире встречаются источники излучения с характеристиками, сохраняющими статистическую устойчивость на протяжении десятков лет.

4. Выводы

1. Исследованы данные шестнадцатилетнего наблюдения за астрофизическими объектами GRS 1915+105, Cygnus X-1 и PSR J1012+5307 на предмет статистической устойчивости излучения в рентгеновском диапазоне частот. Исследования проведены на основе разработанной ранее методики оценки нарушений статистической устойчивости процессов с использованием параметров статистической неустойчивости γ_N^* , h_N^* и μ_N^* .
2. Установлено, что излучение источника GRS 1915+105 носит статистически устойчивый характер на протяжении примерно месяца, источника Cygnus X-1 – на протяжении недели, а пульсара PSR J1012+5307 – на протяжении всего интервала наблюдения (не менее полутора десятка лет).
3. Полученные результаты подтверждают высказанное ранее предположение, что в реальном мире, хотя и редко, но встречаются процессы, обладающие высокой статистической устойчивостью. На интервалах времени, исчисляемых десятками лет, их параметры статистической неустойчивости неотличимы от соответствующих параметров идеально статистически устойчивых процессов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбань И.И. Теория гиперслучайных явлений: физические и математические основы [Электронный ресурс] / Горбань И.И. – К.: Наукова думка, 2011. – 318 с. – Режим доступа: http://www.immsp.kiev.ua/perspages/gorban_i_i/index.html.
2. Горбань И.И. Нарушение статистической устойчивости физических процессов / И.И. Горбань // Математичні машини і системи. – 2010. – № 1. – С. 171 – 184.
3. Gorban I.I. Disturbance of statistical stability / I.I. Gorban // Information Models of Knowledge. – Sofia: ITNEA, 2010. – P. 398 – 410.
4. Горбань И.И. Статистическая устойчивость колебаний температуры воздуха и осадков в районе Москвы / И.И. Горбань // Математичні машини і системи. – 2011. – № 3. – С. 97 – 104.
5. Исследование статистической устойчивости колебаний температуры шельфовой зоны окраинных морей / И.И. Горбань, Н.И. Горбань, В.В. Новотрясов [и др.] // Седьмой Всероссийский симпозиум «Физика геосфер». – Владивосток, 2011. – С. 542 – 547.
6. Горбань И.И. Оценка статистической устойчивости колебаний температуры воздуха и осадков в Москве и Киеве / И.И. Горбань, Ю.Г. Коровицкий // Тези доповідей Шостої наук.-практ. конф. з міжнар. участю “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС ’2011”. – Київ, 2011. – С. 23 – 26.
7. All-Sky Monitor (ASM) team at the Kavli Institute for Astrophysics and Space Research at the Massachusetts Institute of Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://xte.mit.edu/ASM_lc.html.
8. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия. Информация в хаотических сигналах / Тимашев С.Ф. – М.: Физматлит, 2007. – 248 с.
9. Greiner J. An unusual massive stellar black hole in the Galaxy / J. Greiner, J.G. Cuby, M.J. McCaughrean // Nature. – 2001. – Vol. 414. – P. 522 – 524.
10. Гнедин Ю.Н. Небо в рентгеновских и гамма-лучах / Ю.Н. Гнедин // Соровский образовательный журнал. – 1997. – Т. 5. – С. 74 – 79.
11. Горбань И.И. Статистическая неустойчивость физических процессов / И.И. Горбань // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, № 9. – С. 40 – 52.
12. Горбань И.И. Статистически неустойчивые процессы: связь с фликкер, неравновесными, фрактальными и цветными шумами / И.И. Горбань // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 3 – 18.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2012