

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*  
УДК 524.338.6-77

**Шевченко Антон Валерьевич**

**Мониторинг рентгеновских двойных звёзд со  
струйными выбросами**

(1.3.1 – Физика космоса, астрономия)

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Нижний Архыз — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: **Трушкин Сергей Анатольевич**,  
доктор физико-математических наук,  
САО РАН,  
заведующий лабораторией

Официальные оппоненты: **Зинченко Игорь Иванович**,  
доктор физико-математических наук,  
ИПФ РАН,  
заведующий лабораторией  
**Харинов Михаил Александрович**,  
кандидат физико-математических наук,  
ИПА РАН,  
учёный секретарь

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится 2 декабря 2024 года в 15.00 на открытом заседании диссертационного совета 24.1.212.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ октября 2024 года

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова О.Н.

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Рентгеновские двойные системы (РДС), в которых происходят релятивистские струйные выбросы (СВ), называют "микроквазары". Такие системы состоят из двух звёзд, вращающихся вокруг общего центра масс. Одна из них является релятивистским компактным объектом – нейтронной звездой (НЗ) или черной дырой (ЧД) звездной массы. Вторым компонентом является оптическая звезда на главной последовательности или на более поздних стадиях эволюции [1].

Вещество оптической звезды, попадая в радиус захвата релятивистского компаньона (НЗ/ЧД), формирует аккреционный диск. Этот диск характеризуется дифференциальным вращением, когда угловая скорость уменьшается с увеличением радиуса. Вязкое трение между слоями диска обуславливает перераспределение углового момента, вследствие чего вещество постепенно аккрецирует на компактный объект [2].

Оптический компонент может быть, как массивной звездой (О/В типа), так и маломассивной. В случае массивных доноров, поддержание темпа аккреции обеспечивается преимущественно за счет звездного ветра, а для маломассивных ( $M < 3M_{\odot}$ ) характерно перетекание вещества через внутреннюю точку Лагранжа (L1) при заполнении полости Роша [3]. Термин "микроквазар" был предложен Мирабелем и др. в 1992 году из-за морфологического сходства с квазарами – активными ядрами галактик (АЯГ), также обладающими релятивистскими СВ [4].

Микроквазары являются уникальными лабораториями для изучения физики аккреции и релятивистских выбросов. В отличие от АЯГ, процессы в микроквазарах происходят на гораздо меньших временных масштабах, что делает возможным наблюдение их эволюции на коротких временах. Это даёт возможность исследовать связь между изменениями в аккреционном потоке и активностью джетов, что критически важно для понимания механизмов формирования и коллимации релятивистских струй [5]. Наблюдаемая корреляция между рентгеновским и радиоизлучением описывается степенным законом  $L_{\text{radio}} \propto L_X^b$ , где показатель степени  $b$  может принимать значения 0.6-0.7 для разных популяций аккрецирующих ЧД [6]. Такая

корреляция распространяется и на АЯГ, что указывает на инвариантность аккреционных процессов в ЧД разных масс [7].

Наблюдения с высоким угловым разрешением (РСДБ) показали, что радиоизлучение формируется в противоположно направленных СВ (джетах), истекающих из центральных областей системы со скоростями близкими скорости света. Исследования в широком радиодиапазоне показали, что зависимость плотности потока радиоизлучения от частоты – радиоспектр СВ описывается степенным законом, что объясняется синхротронным (нетепловым) механизмом излучения ансамбля релятивистских электронов в магнитном поле. В спокойном состоянии у микроквazarов наблюдается компактный джет, а радиоспектр (далее везде) описывается степенным законом от частоты  $S_\nu \propto \nu^\alpha$  с индексом  $\alpha \approx 0$ , что соответствует оптически толстому синхротронному излучению [8]. В некоторых случаях наблюдаются «сверхсветовые» движения компонентов СВ, что связано с релятивистской абберацией при движении выброса под малым углом к лучу зрения. Измерения переменного радиоизлучения микроквazarов дают возможность исследовать структуру и динамику джетов. Вспышечное радиоизлучение в релятивистских СВ приводит к увеличению потока в несколько раз, а спектр эволюционирует от инвертированного  $\alpha > 0$  к крутому  $\alpha < 0$  по мере того, как источник становится оптически тонким, что объясняется механизмами свободно-свободного поглощения и синхротронного самопоглощения. Характерные времена эволюции таких событий зависят от скорости джетов и их коллимации, а также от частотного диапазона, в котором наблюдались СВ, что объясняется в рамках модели расширяющихся плазменных сгустков (плазмонов) [9]. Согласно этой модели, спад радиопотока после вспышки должен следовать степенному закону от времени  $S_\nu \sim t^{-\frac{2p+3}{4}}$ , где  $p$  - показатель энергетического спектра электронов. Однако часто наблюдается экспоненциальный спад потока. В наблюдениях в широком диапазоне электромагнитных волн детально исследуются различные состояния и фазовые переходы в микроквzарах [10]. В оптическом и инфракрасном диапазонах регистрируется излучение оптической звезды и внешних частей аккреционного диска [11].

На телескопе РАТАН-600 в течение многих лет осуществляется программа мониторинга микроквazarов в радиодиапазоне. Уникальная конструкция телескопа и современные радиометрические комплексы

обеспечивают измерения мгновенных спектров источников в широком диапазоне от 1 до 30 ГГц [12]. Долговременный мониторинг является важным обстоятельством наблюдательных программ на РАТАН-600. Систематические наблюдения на длинном временном интервале предоставляют возможность исследовать эволюцию радиоизлучения микроквazarов, и во время вспышек [13], и в спокойном состоянии [14], что важно для понимания механизмов формирования компактных джетов [15]. Многочастотные наблюдения на РАТАН-600 дают возможность оценивать физические параметры излучающих областей в микроквзарах. Используя модели синхротронного излучения, можно оценить, например, геометрию СВ, магнитное поле или плотность и энергетический спектр релятивистских электронов в джетах. Эти оценки важны для определения механизма ускорения частиц и энергетики джетов.

Очевидно, что микроквзары являются индикаторами многих высокоэнергетических процессов: сверхкритической аккреции, распространения ударных волн (УВ), формирования джетов, а также генерации быстрых частиц и излучения высоких энергий.

Данные долговременного мониторинга рентгеновских двойных звёзд на телескопе РАТАН-600 составили основу наблюдательного материала данной работы. По результатам измерений удалось подтвердить не только ранее исследованные зависимости между состояниями РДС и переменностью излучения, но и обнаружить новые закономерности в кривых блеска в периоды ярких вспышек. Телескоп РАТАН-600 при умеренном разрешении обладает всеми необходимыми характеристиками для осуществления долговременных исследований микроквazarов в радиодиапазоне:

1. высокая чувствительность по плотности потока;
2. многочастотность, за счет уникальной конструкции и оснащения телескопа современными радиометрами;
3. стабильная работа радиометров и автоматизированной системы управления антенны;
4. отлаженная методика наблюдений, обработки и калибровки измерений.

Это даёт возможность исследовать радиоисточники в широком диапазоне частот на разных временных масштабах.

**Целью** данной работы является исследование временных и спектральных характеристик радиоизлучения микроквazarов на телескопе РАТАН-600.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Обработка и калибровка ежедневных измерений программы долговременного мониторинга микроквazarов на телескопе РАТАН-600.
2. Быстрое реагирование на изменения состояний источников для проведения многоволновых и алертных программ.
3. Исследование переменного радиоизлучения микроквazarов в режиме ежедневных измерений, и в режиме многоазимутальных наблюдений.
4. Поиск и анализ закономерностей кривых блеска и спектров в разных диапазонах электромагнитного спектра на временных масштабах от нескольких минут до нескольких лет.
5. Исследование различных фаз взаимодействия аккреционного диска и джета микроквazarов в широком диапазоне электромагнитных волн.
6. Применение существующих моделей вспышечного радиоизлучения переменных источников к микроквazarам.
7. Сравнение полученных результатов измерений с данными других телескопов на более длинных или более коротких длинах волн.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Проведён анализ эволюции кривых блеска и радиоспектра в течение гигантской вспышки системы Cygnus X-3. В результате моделирования показано, что наиболее вероятным механизмом завала спектра на низких частотах является или поглощение тепловыми электронами, или синхротронное самопоглощение внутри источника. В процессе эволюции радиоспектра спектральный индекс ниже 1.25 ГГц изменился так, что частота завала сместилась к более низким частотам. Были оценены минимальная энергия:  $10^{44}$  эрг, магнитное поле: 40 мГс и средняя светимость источника:  $10^{38}$  эрг/с.
2. Впервые на телескопе РАТАН-600 реализован метод многоазимутальных наблюдений дискретных источников, результатом которого стали исследования многочисленных мощных вспышек микроквazarов на временах от 5 минут до 6 часов. Показано, что рост радиопотока на

начальной фазе гигантских вспышек Cygnus X-3 идет линейно от времени. Показано, что это обусловлено конической геометрией, когда форма струйного выброса меняется только по одной координате. Внутрисуточные измерения спокойного состояния Cygnus X-3 наряду с измерениями рентгеновской поляризации с помощью обсерватории IXPE привели к ключевому выводу, что эта система является ультраярким рентгеновским источником.

3. Летом 2018 года в период активности микроквара SS 433 на основе данных РАТАН-600 и рентгеновских обсерваторий исследованы несколько мощных вспышек. В августе 2018 года зарегистрирована исторически самая яркая, оптически тонкая вспышка SS 433. Обнаружено, что во время радиовспышек поток в мягком рентгеновском диапазоне падает в несколько раз, что согласуется с моделью звездного ветра, который блокирует излучение рентгеновских джетов.

### **Научная и практическая значимость**

1. Применение многоазимутального режима работы антенной системы "Южный сектор с Плоским отражателем" для наблюдения дискретных источников показала, что телескоп РАТАН-600 способен осуществлять многочастотные измерения на временах от нескольких минут до нескольких часов.
2. Многочастотные долговременные измерения микрокваров на РАТАН-600 представляют собой уникальный наблюдательный материал, который еще требует глубокого осмысления и анализа.
3. В эпоху открытых данных орбитальных мониторинговых миссий (Swift/BAT, Fermi/LAT, MAXI и др.), РАТАН-600 выполняет важную задачу почти ежедневного патрулирования транзитных источников в широком диапазоне радиоволн.

### **Новизна**

1. Впервые на инструментальной базе антенной системы "Южный сектор с Плоским отражателем" и кабины вторичного зеркала №3 реализована методика внутрисуточных измерений дискретных источников в течение 5.5 часов, которая применялась для исследования микрокваров SS 433, GRS 1915+105 и Cygnus X-3.

2. Впервые по данным одновременных измерений нескольких радиотелескопов (РАТАН-600, АМИ-LA и LOFAR) исследована эволюция спектра Cygnus X-3 в низкочастотном диапазоне в течение яркой вспышки.
3. Впервые на РАТАН-600 проведены измерения внутрисуточной эволюции радиоспектра Cygnus X-3 на начальной стадии радиовспышки.
4. Впервые проведены одновременные измерения в радио и рентгеновском диапазонах в течение ярчайшей вспышки микроквазара SS 433.

### Апробация работы

Результаты диссертации неоднократно представлялись в виде докладов на следующих всероссийских конференциях:

1. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия», Россия, Нижний Архыз, 7 - 11.10.2019, «Гигантские радиовспышки микроквазара Лебедь X-3», Шевченко А.В., Трушкин С.А., Бурсов Н.Н., Цыбулёв П.Г., Нижельский Н.А., Кудряшова А.А., Борисов А.Н.
2. Всероссийская конференция «Наземная астрономия в России. XXI век», Россия, Нижний Архыз, 21 - 25.09.2020, «Обзор микроквазаров на РАТАН-600», Трушкин С.А., Шевченко А.В., Бурсов Н.Н., Цыбулёв П.Г., Нижельский Н.А., Борисов А.Н., Кудряшова А.А.
3. Всероссийская конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Россия, Москва, 23 - 28.08.2021, «Многолетние многочастотные исследования вспышечной активности микроквазаров», Трушкин С.А., Шевченко А.В., Бурсов Н.Н., Цыбулев П.Г., Нижельский Н.А.
4. Всероссийская научная конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022», посвященная 90-летию Ю.Н. Парийского, Россия, Нижний Архыз, 23 - 27.05.2022, «Внутрисуточная переменность микроквазара Лебедь X-3 в период вспышечной активности», Шевченко А.В., Трушкин С.А., Бурсов Н.Н., Цыбулев П.Г., Нижельский Н.А., Кудряшова А.А., Борисов А.Н.
5. Всероссийская научная конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022», посвященная 90-летию Ю.Н. Парийского, Россия, Нижний Архыз, 23 - 27.05.2022, «История многолетних исследований

- галактических рентгеновских двойных со струйными выбросами на РАТАН-600», Трушкин С.А., Шевченко А.В., Бурсов Н.Н., Цыбулев П.Г., Нижельский Н.А.
6. Всероссийская научная конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2023"(НЕА-2023), Россия, Москва, 18 - 21.12.2023, «Гигантские радиовспышки в микроквазаре GRS1915+105», Трушкин С.А., Бурсов Н.Н., Шевченко А.В., Цыбулев П.Г., Нижельский Н.А.
7. Всероссийская астрономическая конференция «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр» (ВАК-2024), Нижний Архыз, 25 – 31.08.2024 «Вспышечная активность микроквазаров - ключ к пониманию процессов аккреции и образования струйных выбросов», Трушкин С.А., Шевченко А.В., Бурсов Н.Н., Цыбулев П.Г., Нижельский Н.А.

### Публикации по теме диссертации

Автор имеет 21 публикацию по теме исследования: [A1-A4] - публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; [K1-K4] - в материалах конференций; [T1-T13] - электронные публикации.

### Рецензируемые публикации

- A1. Strong low-frequency radio flaring from Cygnus X-3 observed with LOFAR / J.W. Broderick, T.D. Russell, R.P. Fender, S.A. Trushkin, D.A. Green, J. Chauhan, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, N.N. Bursov, **A.V. Shevchenko**, G.G. Pooley, D.R.A. Williams, J.S. Bright, A. Rowlinson, S. Corbel // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — Июнь. — Т. 504, № 1. — С. 1482–1494.
- A2. The X-ray Jets of SS 433 in the Period of Flaring Activity in the Summer of 2018 / P.S. Medvedev, I.I. Khabibullin, A.N. Semena, I.A. Mereminskiy, S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, S.Yu. Sazonov // Astronomy Letters. — 2022. — Июль. — Т. 48, № 7. — С. 389–405.
- A3. Study of the Microquasar Cygnus X-3 with the RATAN-600 Radio Telescope in Multi-Azimuth Observing Mode / S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, A.N. Borisov, A.A. Kudryashova // Astrophysical Bulletin. — 2023. — Июнь. — Т. 78, № 2. — С. 225–233.

- A4. Cygnus X-3 revealed as a Galactic ultraluminous X-ray source by IXPE / A. Veledina, и др.; [S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev] // Nature Astronomy. — 2024. — Avr. — Т. 8. — С. 1031–1046.

### Публикации в материалах конференций

- K1. Monitoring of Microquasars with RATAN-600 / S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, A.A. Kudryashova, A.N. Borisov // Ground Based Astronomy in Russia. 21st Century / под ред. I. I. Romanyuk [и др.]. — 12.2020. — С. 351–354.
- K2. Long-term multi-frequency studies of flaring activity from microquasars / S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, N.N. Bursov, P.G. Tsybulev, N.A. Nizhelskij // Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies. — 01.2022. — С. 471–472.
- K3. The Intraday multi-frequency radio observations of the microquasar Cygnus X-3 / **A.V. Shevchenko**, S.A. Trushkin, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, A.A. Kudryashova, A.N. Borisov // The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2000. — 12.2022. — С. 46.
- K4. The history of long-term studies of Galactic X-ray binaries with jet emissions with RATAN-600 / S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev // The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2000. — 12.2022. — С. 48.

### Электронные публикации

- T1. Cygnus X-3 entered in the quenched radio and hard X-ray state / S.A. Trushkin, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Февр. — Т. 12510. — С. 1.
- T2. Evolution of multi-frequency emission from Cygnus X-3 in the current giant flare / S.A. Trushkin, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, N.N. Bursov, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Апр. — Т. 12701. — С. 1.
- T3. RATAN-600 multi-frequency measurements of GRS1915+105 / S.A. Trushkin, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, N.N. Bursov, **A.V.**

- Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Июнь. — Т. 12855. — С. 1.
- T4. New bright radio flare of GRS 1915+105 / S.A. Trushkin, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, N.N. Bursov, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Ноябрь. — Т. 13304. — С. 1.
- T5. Most bright radio flare of GRS 1915+105 for last decade / S.A. Trushkin, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, N.N. Bursov, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2020. — Февр. — Т. 13442. — С. 1.
- T6. Beginning of the new giant flare from Cygnus X-3 / S.A. Trushkin, P.G. Tsybulev, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2020. — Февр. — Т. 13461. — С. 1.
- T7. New giant radio flare from Cyg X-3, correlated with X-rays and gamma-ray flares / S.A. Trushkin, N.N. Bursov, **A.V. Shevchenko**, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, A.N. Borisov // The Astronomer's Telegram. — 2020. — Июнь. — Т. 13835. — С. 1.
- T8. Beginning of a giant radio flare from Cygnus X-3 / S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev // The Astronomer's Telegram. — 2021. — Июль. — Т. 14821. — С. 1.
- T9. New short-time radio and X-ray flare from GRS1915+105 / S.A. Trushkin, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2023. — Март. — Т. 15964. — С. 1.
- T10. Giant radio flare from GRS1915+105 / S.A. Trushkin, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2023. — Апр. — Т. 15974. — С. 1.
- T11. New radio flare from GRS 1915+105 / S.A. Trushkin, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev, **A.V. Shevchenko** // The Astronomer's Telegram. — 2023. — Авг. — Т. 16168. — С. 1.
- T12. The going-on bright flare from the X-ray binary Cygnus X-3 / S.A. Trushkin, N.N. Bursov, **A.V. Shevchenko**, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Апр. — Т. 16581. — С. 1.
- T13. The fourth giant flare of Cygnus X-3 in 2024 / S.A. Trushkin, **A.V. Shevchenko**, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, P.G. Tsybulev // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Июль. — Т. 16738. — С. 1.

## Личный вклад автора

Во всех опубликованных работах автор самостоятельно обрабатывал, калибровал и анализировал данные мониторинга микроквazarов на телескопе РАТАН-600, а также обсуждал результаты совместно с научным руководителем Трушкиным С.А. Результаты работ [А3, К1-К4, Т1 - Т17] неоднократно представлялись автором на всероссийских конференциях. Автор принимал непосредственное участие в подготовке текстов публикаций. Участвовал в обсуждении результатов наравне с соавторами.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 125 страниц, включая 40 рисунков, 11 таблиц и 1 приложение. Список литературы содержит 246 наименований.

Во **введении** представлен подробный обзор наблюдательных данных по рентгеновским двойным звёздам со струйными выбросами – микроквazarов. Обзор описывает ключевые элементы РДС: релятивистский объект и оптическая звезда, аккреционный диск и струйные выбросы. Описаны наблюдательные проявления в различных диапазонах электромагнитного спектра; описание сходств и отличий между различными объектами, демонстрирующими струйные выбросы, например, квazarы, проведено обсуждение физических механизмов, ответственных за спектральную переменность в рентгеновском и радиодиапазоне; подчеркнута тесная связь между аккрецией и струйными выбросами. Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна, научная и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дано описание инструмента телескопа РАТАН-600, методов исследования микроквazarов, включая обработку записей, калибровку по потоку и последующий анализ наблюдательных данных. В **разделе 1.1** представлено описание основных режимов работы антенны при наблюдениях дискретных источников и характеристики радиометрических комплексов. **Раздел 1.2** посвящен режиму многоазимутальных наблюдений. В **разделе 1.3** представлено описание методов обработки

файлов кривых прохождений и калибровки плотности потока по опорным источникам. В **разделе 1.4** описан метод анализа временных рядов.

**Вторая глава** посвящена результатам программы долговременного мониторинга микроквazarов на ПАТАН-600. В **разделе 2.1** обсуждаются наблюдения микроквazара SS 433, представлен исторический обзор данной системы. В **разделе 2.1.2** представлены результаты многоволновой наблюдательной кампании в период ярких вспышек в системе SS 443 в 2018 году, в **разделе 2.1.3** обсуждаются основные результаты и выводы. **Раздел 2.2** посвящен результатам мониторинга периодов повышенной активности микроквazара GRS 1915+105 на телескопе ПАТАН-600. В 2019-2020 гг. наблюдались многократные вспышки, связанные со струйными выбросами. В 2023 году были зарегистрированы две ярчайшие радиовспышки, свойства которых подробно рассмотрены. В **разделе 2.3** представлены результаты долговременного мониторинга периодических вспышек в системе LS I + 61°303, в первую очередь периодические свойства кривых блеска.

**Третья глава** посвящена результатам исследований вспышечной активности микроквazара Cygnus X-3 на разных временных масштабах. В **разделе 3.1** представлены результаты исследования радиовспышки в диапазоне 143.5 - 15 ГГц. В **разделе 3.1.1** описано предвспышечное состояние системы. В **разделах 3.1.2, 3.1.3 и 3.1.4** представлены результаты численного моделирования низкочастотного завала радиоспектра. В **разделе 3.1.5** обсуждаются численные параметры и энергетика вспышек. **Раздел 3.2** посвящен мониторингу периодов высокой активности микроквazара Cygnus X-3 на телескопе ПАТАН-600 в течение нескольких лет, когда неоднократно проводились измерения свойств излучения Cygnus X-3 в различных режимах работы антенны. Впервые обсуждена внутрисуточная переменность источника. В **заключении** приведены основные результаты проведенных исследований. В **приложении** приведена полная таблица измерений плотностей потока SS 433 в течение активного периода нескольких вспышек летом 2018 года.

## Список литературы

1. *Mirabel, I. F.* Sources of Relativistic Jets in the Galaxy / I. F. Mirabel, L. F. Rodríguez // Annual Review of Astron and Astrophys. — 1999. — ЯНВ. — Т. 37. — С. 409—443. — arXiv: [astro-ph/9902062](#) [[astro-ph](#)].
2. *Shakura, N. I.* Black holes in binary systems. Observational appearance. / N. I. Shakura, R. A. Sunyaev // A&A. — 1973. — ЯНВ. — Т. 24. — С. 337—355.
3. *Frank, J.* Accretion Power in Astrophysics: Third Edition / J. Frank, A. King, D. J. Raine. — 2002.
4. A double-sided radio jet from the compact Galactic Centre annihilator 1E1740.7-2942 / I. F. Mirabel [и др.] // Nature. — 1992. — Июль. — Т. 358, № 6383. — С. 215—217.
5. *Fender, R. P.* Jets from black hole X-ray binaries: testing, refining and extending empirical models for the coupling to X-rays / R. P. Fender, J. Homan, T. M. Belloni // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2009. — Июль. — Т. 396, № 3. — С. 1370—1382. — arXiv: [0903.5166](#) [[astro-ph.HE](#)].
6. *Gallo, E.* Assessing luminosity correlations via cluster analysis: evidence for dual tracks in the radio/X-ray domain of black hole X-ray binaries / E. Gallo, B. P. Miller, R. Fender // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Июнь. — Т. 423, № 1. — С. 590—599. — arXiv: [1203.4263](#) [[astro-ph.HE](#)].
7. *Merloni, A.* A Fundamental Plane of black hole activity / A. Merloni, S. Heinz, T. di Matteo // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2003. — Ноябрь. — Т. 345, № 4. — С. 1057—1076. — arXiv: [astro-ph/0305261](#) [[astro-ph](#)].
8. *Fender, R. P.* Powerful jets from black hole X-ray binaries in low/hard X-ray states / R. P. Fender // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2001. — Март. — Т. 322, № 1. — С. 31—42. — arXiv: [astro-ph/0008447](#) [[astro-ph](#)].
9. *van der Laan, H.* A Model for Variable Extragalactic Radio Sources / H. van der Laan // Nature. — 1966. — Сент. — Т. 211, № 5054. — С. 1131—1133.

10. *Fender, R.* The Balance of Power: Accretion and Feedback in Stellar Mass Black Holes / R. Fender, T. Muñoz-Darias // Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag. Т. 905 / под ред. F. Haardt [и др.]. — 2016. — С. 65.
11. Global optical/infrared-X-ray correlations in X-ray binaries: quantifying disc and jet contributions / D. M. Russell [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2006. — СЕНТ. — Т. 371, № 3. — С. 1334—1350. — arXiv: [astro-ph/0606721](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0606721) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].
12. *Trushkin, S. A.* The multifrequency monitoring of microquasars. SS433 / S. A. Trushkin, N. N. Bursov, N. A. Nizhelskij // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 2003. — ЯНВ. — Т. 56. — С. 57—90. — arXiv: [astro-ph/0403037](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0403037) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].
13. Study of the Microquasar Cygnus X-3 with the RATAN-600 Radio Telescope in Multi-Azimuth Observing Mode / S. A. Trushkin [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2023. — ИЮНЬ. — Т. 78, № 2. — С. 225—233. — arXiv: [2311.13239](https://arxiv.org/abs/2311.13239) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE)].
14. Cygnus X-3 revealed as a Galactic ultraluminous X-ray source by IXPE / A. Veledina [и др.] // Nature Astronomy. — 2024. — АВГ. — Т. 8. — С. 1031—1046.
15. *Trushkin, S. A.* Radio Variability of the Galactic X-ray Binaries with Relativistic Jets / S. A. Trushkin, N. N. Bursov // The Universe at Low Radio Frequencies. Т. 199 / под ред. A. Pramesh Rao, G. Swarup, Gopal-Krishna. — 01.2002. — С. 397. — (IAU Symposium).

Бесплатно

*Шевченко Антон Валерьевич*

Мониторинг рентгеновских двойных звёзд со струйными выбросами

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_