

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**

Специальность 1.3.1 —  
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физ.-мат. наук Трушкин С.А.

Нижний Архыз — 2024

## Оглавление

|   | Стр.      |
|---|-----------|
| Введение . . . . .  | 4         |
| <b>Глава 1. Инструменты и методы долговременного мониторинга<br/>радиоисточников на телескопе РАТАН-600 . . . . .</b>                               | <b>23</b> |
| 1.1 Штатные режимы работы антенны . . . . .   | 23        |
| 1.2 Режим многоазимутальных наблюдений . . . . .  | 27        |
| 1.3 Методы обработки файлов кривых прохождений и калибровки<br>по плотности потока опорных источников . . . . .                                     | 31        |
| 1.4 Метод анализа временных рядов . . . . .   | 33        |
| <b>Глава 2. Результаты многоволновых исследований<br/>микроквazarов . . . . .</b>   | <b>35</b> |
| 2.1 SS 433 . . . . .  | 35        |
| 2.1.1 Введение . . . . .  | 35        |
| 2.1.2 Релятивистские выбросы в системе SS 433 летом 2018 года . . . . .   | 42        |
| 2.1.3 Выводы . . . . .  | 49        |
| 2.2 GRS 1915+105 . . . . .  | 50        |
| 2.2.1 Введение . . . . .  | 50        |
| 2.2.2 Спорадические яркие вспышки с 2019 по 2021 год . . . . .  | 56        |
| 2.2.3 Гигантские вспышки в 2023 году . . . . .  | 60        |
| 2.2.4 Выводы . . . . .  | 64        |
| 2.3 LS I+61° 303 . . . . .  | 65        |
| 2.3.1 Введение . . . . .  | 65        |
| 2.3.2 Периодичные вспышки в радиодиапазоне . . . . .  | 68        |
| 2.3.3 Выводы . . . . .  | 69        |
| <b>Глава 3. Эволюция радиоизлучения гигантских вспышек в<br/>системе Cygnus X-3 в широком диапазоне на разных<br/>временных масштабах . . . . .</b> | <b>71</b> |
| 3.1 Наблюдения яркой вспышки совместно с низкочастотными<br>данными LOFAR . . . . .   | 72        |
| 3.1.1 Совместные измерения яркой вспышки . . . . .  | 74        |

|   | Стр.       |
|---|------------|
| 3.1.2 Широкополосные спектральные характеристики . . . . .                                    | 77         |
| 3.1.3 Моделирование низкочастотного завала радиоспектра . . .                                 | 80         |
| 3.1.4 Сравнение максимума вспышки на частоте 143.5 МГц с<br>предсказаниями модели . . . . .   | 82         |
| 3.1.5 Энергетика вспышки . . . . .  | 85         |
| 3.1.6 Выводы . . . . .  | 86         |
| 3.2 Результаты мониторинга в периоды ярких вспышек на разных<br>временных масштабах . . . . . | 87         |
| 3.2.1 Выводы . . . . .  | 96         |
| <b>Список литературы . . . . .</b>  | <b>99</b>  |
| <b>Приложение А. Результаты измерений спектральных<br/>плотностей потока SS 433 . . . . .</b> | <b>123</b> |

## Введение

Рентгеновские двойные системы (РДС), в которых происходят релятивистские струйные выбросы (СВ), называют "микроквazarы". 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. Второй компонент – 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 "микроквazar" был предложен Мирабелем и др. в 1992 году из-за морфологического сходства с квазарами – активными ядрами галактик (АЯГ), также обладающими релятивистскими СВ [4].

Микроквazarы являются уникальными лабораториями для изучения физики аккреции и релятивистских выбросов. В отличие от АЯГ, процессы в микроквazарах 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 микроквазаров 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 микроквазаров 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 микроквазарах [10]. В оптическом и инфракрасном диапазонах регистрируется излучение оптической звезды и внешних частей аккреционного диска [11].

Рентгеновское излучение характеризует состояние внутренних областей аккреционного диска, а гамма-лучи – наиболее энергичное излучение, связывают с механизмами обратного комптоновского рассеяния и адронными процессами в джетах. Также, в рентгеновском диапазоне наблюдаются квазипериодические осцилляции (КПО) с частотами от долей Гц до кГц, которые связывают с последними устойчивыми орбитами вещества [12]. В рентгенов-

ском диапазоне выделяют два основных спектральных состояния: жесткое и мягкое [13]. В жестком состоянии доминирует степенной компонент спектра с фотонным индексом  $\Gamma \sim 1.4 - 1.9$ , и наблюдаются устойчивые радиоджеты. В мягком состоянии преобладает тепловой спектр с максимумом около 1 кэВ, а радиоизлучение джетов подавлено. Переходы между состояниями сопровождаются изменениями в структуре аккреционного потока и активности джетов, что наглядно отображается на диаграмме жесткость–интенсивность (HID) [14].

Механизмы ускорения частиц до релятивистских энергий остаются предметом дискуссий. Наиболее вероятным сценарием считается ускорение на ударных волнах внутри джетов посредством механизма Ферми первого порядка [15]. Альтернативные модели включают ускорение в областях магнитного пересоединения или в турбулентных зонах джетов [16]. Ускоренные электроны производят синхротронное излучение в радиодиапазоне, а также участвуют в обратном комптоновском рассеянии, внося вклад в жесткое рентгеновское и гамма-излучение. Устойчивое гамма-излучение с энергиями выше 100 МэВ обнаружено у микроквара Cygnus X-3 [17], который вероятно является источником и нейтринных событий [18]. Периодическое гамма-излучение наблюдается в системе LS I + 61°303 [19], а транзиентные события – в Cygnus X-1 [20]. Эти наблюдения указывают на возможность ускорения частиц до очень высоких энергий в микрокварах, а теоретические модели предполагают генерацию гамма-излучения как в лептонных, так и в адронных процессах [21].

Особое значение имеют одновременные многоволновые наблюдения различных состояний микрокваров. В периоды высокой активности наблюдаются быстрые изменения в структуре аккреционного потока и формирование мощных СВ [22]. Многоволновые кампании нацелены на изучение эволюции спектра источника от радио до гамма-диапазона, что важно для сопоставления наблюдательных данных с теоретическими моделями [23]. Развитие численных методов и вычислительных мощностей обеспечило возможность детального моделирования физических процессов в микрокварах. Магнитогидродинамические модели аккреционных потоков и формирования джетов способствуют определению механизмов коллимации и ускорения релятивистских выбросов [24]. Модели переноса излучения используются для расчёта теоретических спектров и кривых блеска, которые можно непосредственно сравнивать с наблюдениями [25].

## Физическое сходство объектов с релятивистскими струйными выбросами

Характерной особенностью микроквazarов является наличие противоположнонаправленных коллимированных истечений газа и плазмы в джетах [1]. Релятивистские СВ, скорость которых обычно характеризуется фактором Лоренца  $\gamma$ , являются очень мощными источниками нетеплового излучения, обнаруживаемого на разных длинах волн. Необходимо отметить, что джеты не являются устойчивыми структурами – их наличие или отсутствие зависит от темпа аккреции, то есть от рентгеновского состояния системы. СВ в квазарах распространяются на несколько миллионов парсек от центральной машины, что на несколько порядков превышает расстояние распространения СВ в микрокварах (Рис. 1).

Морфологическая аналогия, предложенная в [4] касается не только существования релятивистских СВ, квазары также содержат ЧД в качестве центральных объектов, которые аккрецируют материал из окружающей среды. Основное различие заключается в масштабах центральной машины. В то время как микроквараы включают ЧД звездных масс, в квазарах предполагается существование сверхмассивных черных дыр (СМЧД) выше нескольких миллионов солнечных масс [27]. С другой стороны, аккреционный диск квазаров подпитывается не оптическим компонентом, а веществом из межзвездной среды родительской галактики и от разрушенных гравитационным притяжением звезд. Тем не менее, тепловые температуры, достигаемые в аккреционных дисках квазаров за счет вязкой/фрикционной диссипации, составляют тысячи градусов, а не нескольких миллионов градусов, как в случае микроквараов. Причина в том, что чем массивнее ЧД, тем холоднее будет ее аккреционный диск. Согласно [28], характерная температура черного тела на последней устойчивой орбите диска для ЧД, аккрецирующей на пределе Эддингтона, определяемом в терминах светимости Эддингтона ( $L_{\text{Edd}}$ ), равна  $T \text{ [K]} \approx 10^7 M^{-1/4} [M_{\odot}]$ . Следовательно, большая часть излучения, возникающего в аккреционном диске квазаров, испускается в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах в отличие от микроквараов, где излучение диска соответствует рентгеновскому диапазону.

Главное отличие физических процессов, наблюдаемых в микрокваравах по сравнению с АЯГ заключается во временных масштабах наблюдаемых явлений.

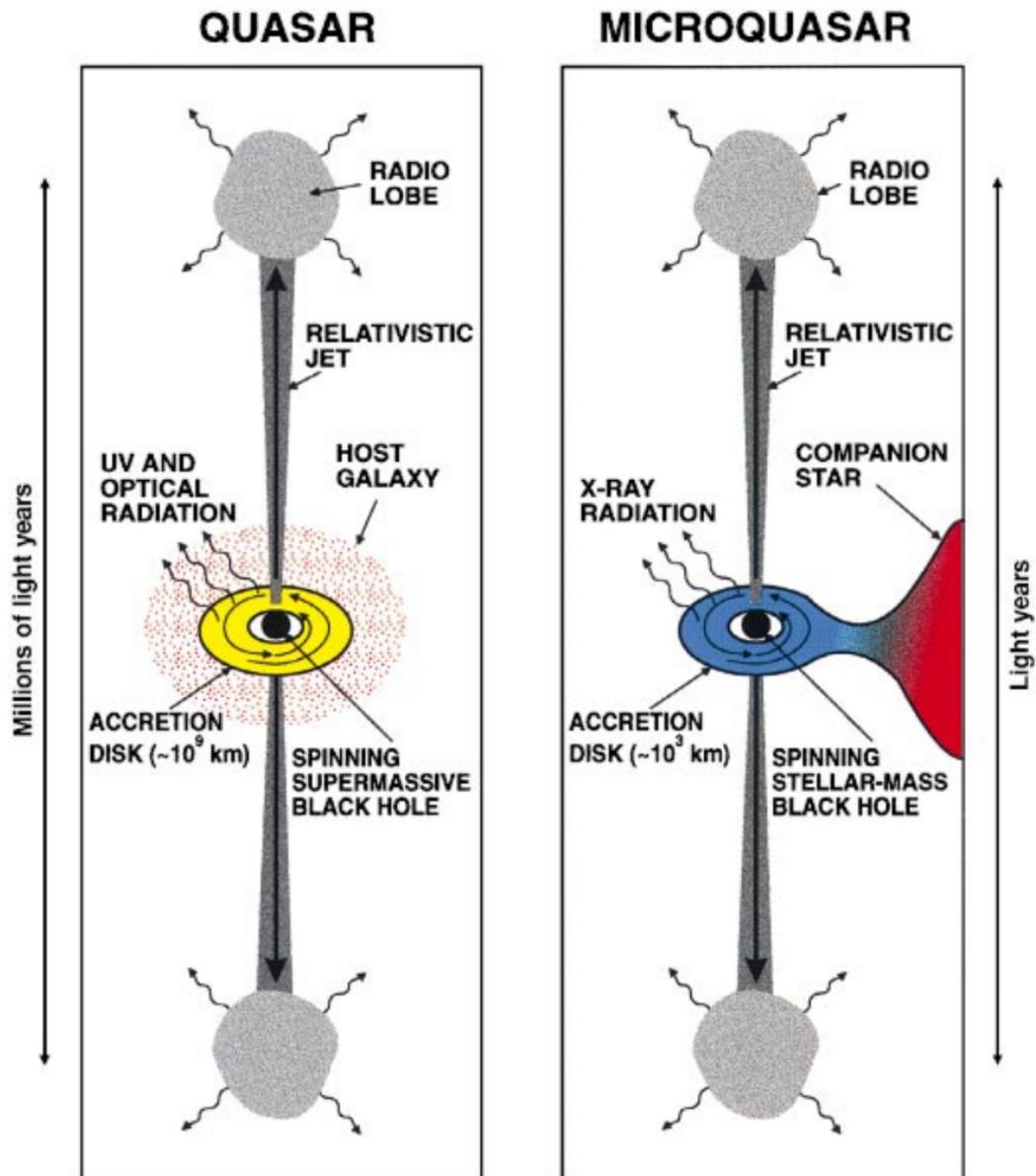


Рисунок 1 — Сравнение квазаров и микроквазаров. В обоих случаях обнаружены три компонента: центральная ЧД, аккреционный диск и коллимированные релятивистские джеты. Также выделены основные различия [26].

Известно, что характерное время процесса аккреции пропорционально массе ЧД. В то время как в микроквазарах могут происходить вариации потока в течение суток или даже часов, пришлось бы ждать тысячи лет, чтобы наблюдать тот же эффект вокруг большинства СМЧД [1]. В мониторинге микроквазаров исследуется не только физика и эволюция СВ в связи с аккреционным потоком, но и механизм ускорения частиц внутри джетов и происхождение гамма-излучения очень высоких энергий. Необходимо отметить, что масса оптической звезды оказывает непосредственное влияние на свойства аккрецируемого вещества (например, температура или скорость), что прямо действует на аккреционный диск (например, на характер излучения аккреционного диска или силу его магнит-

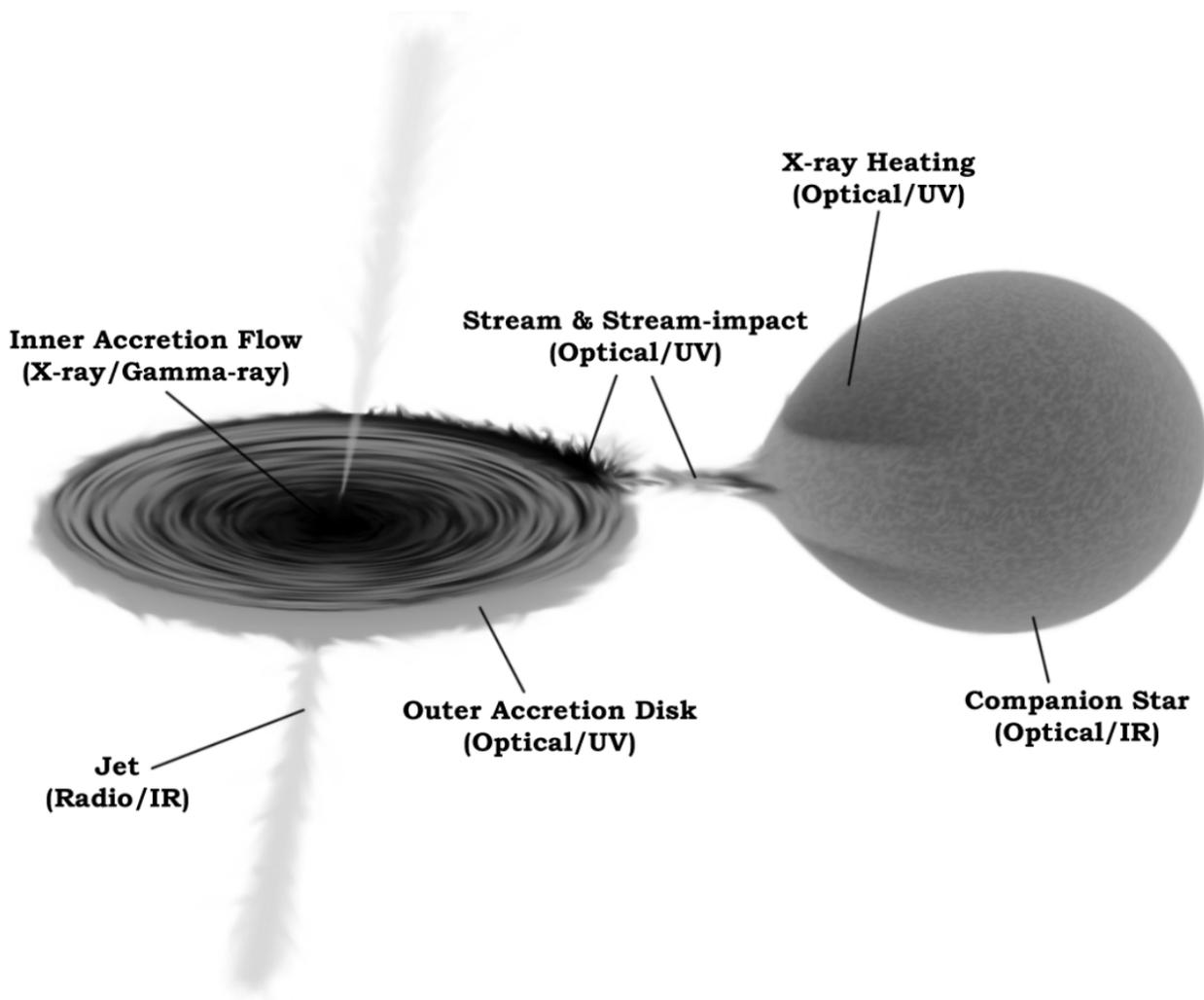


Рисунок 2 — Геометрия рентгеновской двойной звезды с перетеканием вещества через полость Роша [29]. Компоненты: оптическая звезда, поток аккреционного диска, джет.

ного поля). Хотя механизм производства и коллимации джетов детально не исследован, принято считать, что эти потоки плазмы в СВ также питаются процессом аккреции, учитывая прямые доказательства корреляции этих двух механизмов [14].

### Аккреционный диск

Движение и потеря энергии за счет вязкости и трения газового потока внутри аккреционного диска обычно описываются гидродинамическими уравнениями стандартной дисковой модели (СДМ) [2]. Эта потеря энергии эквивалентна энергии связи на последней устойчивой орбите, радиус которой зависит от компактного объекта. В случае ЧД последняя устойчивая орбита соответствует примерно трем радиусам Шварцшильда ( $R_{\text{Sch}}$ ), в то время как для нейтронной звезды это ее собственная поверхность.

СДМ не может объяснить такое высокоэнергетическое излучение, если не ввести новый компонент. Этот компонент называется короной из горячей плазмы с  $T \sim 10^9$  К во внутренних областях аккреционного диска [30]. Вблизи компактного объекта (на расстоянии  $\lesssim 100R_{\text{Sch}}$ ), аккреционный диск имеет низкую плотность, а значит эффективность охлаждения за счет вязкости также низкая. Это приводит к повышению температуры, которое раздувает газ диска, формируя корону. Жесткое рентгеновское излучение испускается за счёт комптонизации тепловых фотонов из аккреционного диска высокоэнергетическими электронами в короне. Предполагается, что жесткое рентгеновское излучение производится внутри джетов в результате обратного комптоновского рассеяния внешних фотонов аккреционного диска или оптической звезды (Рис. 2).

### Релятивистские радиоджеты

Радиоджеты сильно коллимированы, демонстрируя углы раскрытия менее  $15^\circ$  [1]. Обычно угол между СВ и лучом зрения составляет  $\gtrsim 30^\circ$ . Вероятность обнаружения джетов с меньшими углами довольно мала. Микроквазары, СВ которых образует углы  $\lesssim 10^\circ$  относительно луча зрения, известны как микроблазары [1]. В таких системах временные масштабы сокращаются в  $2\gamma$  раз, где  $\gamma$  – фактор Лоренца, а плотность потока увеличивается в  $8\gamma^3$  раз. Таким образом, хотя интенсивность усиливается по сравнению с микроквазарами, быстрая переменность, наряду с низкой вероятностью обнаружения, делает микроблазары трудными для обнаружения и достаточно редкими радиоисточниками. На протяжении многих лет было предложено несколько моделей формирования и коллимации СВ, а также их связи с процессом аккреции (см. работы Блэндфорда и др. [31–33], Учиды и др. [34; 35], а также Мейера [36]). В настоящее время наиболее популярной является магнитогидродинамическая (МГД) модель, которая предполагает наличие аккретора, полоидального магнитного поля и дифференциального вращения при условии высокой проводимости. Общий обзор модели можно найти в [37].

Создание релятивистских СВ в микроквазарах, по-видимому, связано с толстыми аккреционными дисками, поскольку джеты не обнаруживаются, когда система имеет оптически тонкие диски, независимо от природы компактного объекта. Одной из причин может быть недостаточно сильное магнитное поле тонкого аккреционного диска, не способное коллимировать джеты. Внутри

СВ было обнаружено нетепловое излучение в широком диапазоне [38]. Также сообщалось о гамма-лучах высоких энергий от микроквара Cygnus X-3 на энергиях выше 100 МэВ, обнаруженный AGILE [19] и Fermi-LAT ([17]). Все эти результаты свидетельствуют о существовании популяции релятивистских частиц внутри потоков, которые, как считается, ускоряются посредством ускорения Ферми. Этот механизм ускорения предполагает наличие УВ, происхождение которых в микрокварах объясняется следующими моделями:

1. Джеты, как дискретные выбросы плазмы. В этом сценарии УВ формируются самими джетами, которые вылетают из центральных областей РДС в виде сгустков. Эти сгустки могут иметь различные скорости внутри СВ, а значит могут взаимодействовать друг с другом, создавая внутренние УВ. Ожидаемое излучение характеризовалось бы определенной переменностью, обусловленной инжекцией сгустков [9], [39].

2. Джеты, как непрерывное истечение плазмы. В этом случае предполагается, что поток плазмы непрерывен, а УВ, которые ускоряют частицы, возникают внутри джета из-за взаимодействия областей с различными характеристиками (такими как плотность или скорость [40]).

### Связь диска и джета

РДС с ЧД составляют значительную часть микрокваров в нашей Галактике. Эти объекты характеризуются высокой переменностью в рентгеновском диапазоне, которая также распространяется на другие длины волн. Переменная природа этих систем связана с изменениями в темпе аккреции. Большую часть времени они проводят при низких темпах аккреции, что приводит к низкой рентгеновской светимости порядка  $L_X \lesssim 10^{33}$  эрг/с. Однако периодически наблюдаются яркие вспышки, длящиеся от нескольких дней до недель. Важно отметить, что вспышки в радиодиапазоне являются достаточно редким событием, и лишь небольшое количество микрокваров являются постоянными источниками синхротронного излучения. Важным инструментом для описания поведения РДС с СВ стала так называемая q-диаграмма (диаграмма жесткость–интенсивность), предложенная Фендером и др. [14]. На этой диаграмме ось абсцисс соответствует жесткости рентгеновского излучения, то есть отношению между жестким и мягким рентгеновским излучением. Чем выше это значение, тем жестче энергетический спектр. Ось ординат отражает интенсивность рентгеновского потока. Важной особенностью этой диаграммы является

то, что движение источника по ней происходит против часовой стрелки. На этой траектории выделяются два основных рентгеновских состояния: *жесткое состояние* (HS) и *мягкое состояние* (SS). Жесткое состояние характеризуется доминированием степенного распределения фотонов с показателем степени  $\Gamma$  в диапазоне от 1.4 до 1.9. Этот спектр имеет экспоненциальное обрезание на высоких энергиях, около сотен кэВ. В этом состоянии тепловой компонент очень слаб и достигает пика при энергии около 0.1 кэВ. Общая рентгеновская светимость в жестком состоянии может достигать нескольких процентов от эддингтоновской светимости, как отмечено в работе [41]. Важной особенностью жесткого состояния является наличие устойчивого радиоджета. Это указывает на корреляцию между жестким рентгеновским и радиоизлучением. Мягкое состояние, в отличие от жесткого, характеризуется доминированием теплового компонента черного тела. Этот компонент достигает пика при энергии около 1 кэВ и излучается главным образом из внутренних областей аккреционного диска, который простирается до последней устойчивой орбиты. В этом состоянии также присутствует более мягкий степенной хвост с показателем степени  $\Gamma$  в диапазоне от 2.2 до 2.7, который простирается за 500 кэВ.

Интересно отметить, что рентгеновская светимость в мягком состоянии никогда не наблюдалась ниже 1% от эддингтоновской светимости в РДС с ЧД. Другой особенностью мягкого состояния является подавленное радиоизлучение. Переход между жестким и мягким состояниями осуществляется через так называемое промежуточное состояние (IS), когда наблюдается быстрая и сильная радиопеременность, которая связана с внутренними УВ внутри в джетах. Важно понимать, что нестабильности в аккреционном диске, вызванные изменениями темпа аккреции, оказывают существенное влияние на излучение джетов. Это влияние проявляется как в рентгеновском, так и в радиодиапазоне.

В модели Фендера выделяются следующие рентгеновские состояния [14]:

1. *Жёсткое состояние*. Характеризуется низкой светимостью, что соответствует низкому темпу аккреции. Это состояние может достигать самых низких светимостей, известных как состояние покоя. Здесь наблюдается постоянный джет, характеризующийся синхротронным радиоизлучением, а также присутствует горячая корона, которая является источником жесткого рентгеновского излучения. Последняя устойчивая орбита аккреционного диска в этом состоянии системы находится на максимальном расстоянии от ЧД.

2. *Переходное состояние.* Темп аккреции начинает увеличиваться, и движение по диаграмме жесткость–интенсивность (HID) становится почти вертикальным, пока система не войдет в жесткое/промежуточное состояние. В этот момент спектр начинает смягчаться из-за потери температуры в короне, что связано с обратными комптоновскими процессами на тепловых фотонах из диска. В результате тепловое излучение становится более заметным. Одновременно с увеличением темпа аккреции повышается плотность газа, который начинает охлаждаться посредством синхротронного и тормозного излучения, способствуя переходу системы в мягкое состояние (SS). В этой фазе корона сжимается, а внутренняя устойчивая орбита приближается к черной дыре. Из-за сохранения углового момента, чем ближе вещество подходит к компактному объекту, тем выше скорость внутри джетов, хотя фактор Лоренца все еще остается  $\gamma \lesssim 2$ .

3. *Промежуточное состояние.* Источник продолжает двигаться к более мягкому состоянию. Тепловое излучение от диска становится доминирующим по отношению к жесткому рентгеновскому излучению от короны. Система приближается к так называемой линии джета – вертикальной линии на диаграмме жесткость–интенсивность, которая разделяет состояния с присутствием релятивистских выбросов и без них. В этом состоянии джет становится нестабильным, что приводит к быстрому увеличению фактора Лоренца ( $\gamma > 2$ ). Это вызывает внутренние УВ в выбросе перед его разрушением при входе в мягкое состояние. Процессы реактивации джетов, вызывающие вспышечную активность, могут происходить многократно.

4. *Мягкое состояние.* Микроквазар наконец входит в состояние, в котором радиоджет не обнаруживается. Поэтому в рентгеновском спектре преобладает тепловая компонента чёрного тела от аккреционного диска. Важно отметить, что на этой фазе темп аккреции достигает своего максимума, что приводит к расширению внутренней устойчивой орбиты близко к ЧД. После достижения пика аккреции, темп аккреции начинает уменьшаться. Это приводит к уменьшению плотности газа во внутренней части диска, что способствует формированию короны. В результате микроквазар возвращается в жесткое состояние (HS), где снова появляются релятивистские джеты, в которых частицы могут ускоряться до гамма-лучей.

Важно подчеркнуть, что эта модель предоставляет унифицированное описание связи между аккреционным диском и джетами в микроквазарах с черными дырами. Она объясняет наблюдаемые корреляции между рентгеновским

и радиоизлучением, а также изменения в спектральных и временных характеристиках этих систем.

Модель также демонстрирует, как изменения в темпе аккреции влияют на структуру аккреционного диска и короны, что в свою очередь определяет наличие или отсутствие джетов и их характеристики. Это подчеркивает тесную взаимосвязь между процессами аккреции и выброса вещества в этих экстремальных астрофизических объектах.

Таким образом, поведение микроквazarов характеризуется переходами между различными спектральными состояниями, которые тесно связаны с изменениями в структуре аккреционного потока и активности джетов. Модель, предложенная Фендером, представляет собой основу для понимания этих процессов, связывая наблюдаемые спектральные и временные характеристики с физическими процессами, происходящими вблизи ЧД. Дальнейшие исследования этих объектов, особенно с использованием современных многоволновых наблюдательных инструментов, несомненно, приведут к еще более глубокому пониманию физики аккреции и выбросов в экстремальных условиях вблизи ЧД.

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 [42]. 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 [43], и в спокойном состоянии [44], что важно для понимания механизмов формирования компактных джетов [45]. 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 микроквazarы 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 и алертных 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.

## Основные 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 микроквзара 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 микроквazarов 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 транзиентных источников в широком диапазоне радиоволн.

### **Научная 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 микроквazarов SS 433, GRS 1915+105 и Cygnus X-3.

2. Впервые по данным одновременных измерений нескольких радиотелескопов (РАТАН-600, АМI-LA и LOFAR) исследована эволюция спектра микроквзара Cygnus X-3 в низкочастотном диапазоне в течение яркой вспышки.

3. Впервые на телескопе РАТАН-600 проведены измерения внутрисуточной эволюции радиоспектра Cygnus X-3 на начальной стадии радиовспышки.

4. Впервые проведены одновременные измерения в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах в течение ярчайшей вспышки микроквзара 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 микроквзара 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 микроквazarов 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 микроквazarов», 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"(HEA-2023), Россия, Москва, 18 - 21.12.2023, «Гигантские радиовспышки в микроквазаре GRS1915+105 в 2023 году», 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] - публикации 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. — Август. — 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. — НОЯБ. — 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.

## Содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и приложений. Полный объём диссертации составляет 125 страниц, включая 40 рисунков и 11 таблиц. 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, квазары, 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. Дан список докладов о результатах работы и список публикаций, содержащих основные результаты диссертации.

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** коротко описан метод анализа временных рядов.

**Вторая глава** посвящена результатам программы долговременного мониторинга микроквazarов на РАТАН-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 РАТАН-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 РАТАН-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** перечислены основные результаты проведенных исследований. В **приложении** приведена полная таблица измерений плотностей потока SS 433 в течение активного периода нескольких вспышек летом 2018 года.

## Глава 1. Инструменты и методы долговременного мониторинга радиоисточников на телескопе РАТАН-600

### 1.1 Штатные режимы работы антенны

РАТАН-600 — крупнейший в мире радиотелескоп с антенной переменного профиля [46—50], т.е. многоэлементной антенной рефлекторного типа, где отражающая поверхность главного зеркала антенны состоит из 895 одинаковых отражающих элементов с размерами  $11.5 \text{ м} \times 2.1$  и имеющих радиус кривизны около 300 м по горизонтали [49; 50]. Каждый элемент имеет три степени свободы: радиальное перемещение и вращение по вертикали угла места и по азимуту. Благодаря особенностям геометрии телескопа и современной системе радиометров континуума, в пределах небольших поперечных aberrаций с малыми потерями сигнала удаётся измерять антенные температуры источников в широком диапазоне радиочастот, что даёт возможность исследовать спектральную переменность наблюдаемых объектов. Диаграмма направленности (ДН) антенны формируется в результате специального расположения отражающих элементов и вторичного зеркала (ВЗ), которое находится в фокусе отражающей поверхности. Перемещение ДН или изменение направления на источник происходит за счёт изменения взаимного положения отражающих элементов и ВЗ, то есть изменения формы отражающей поверхности. Кривая, по которой устанавливаются центры отражающих элементов главного зеркала (ГЗ), представляет собой параболу. В свою очередь ВЗ устанавливается в фокусе антенны, а его форма представляет собой параболический полуцилиндр с горизонтальной образующей [51].

Режимы наблюдений на одном секторе (четверть ГЗ) являются основными для всех наблюдательных программ на телескопе. Апертура и фокусное расстояние антенны меняются в зависимости от высоты наблюдаемого объекта. Для углов места, близких к горизонту, используются  $\sim 160$  из 225 отражающих элементов. Для углов места, выше 51 градуса, используются все отражающие элементы. Сейчас наблюдения осуществляются в четырёх режимах работы антенны: Северный сектор, Южный сектор, Западный сектор и Южный сектор с Плоским отражателем. Таким образом, наблюдательные программы осуществляются одновременно в нескольких конфигурациях радиотелескопа (на трёх

независимых секторах антенны, Северном, Южном и Западном), перекрывая широкий диапазон склонений. Для каждой антенной системы используется собственное ВЗ, в фокальной плоскости которого располагается специализированный комплекс радиометров континуума.

Современный уровень приемной аппаратуры радиотелескопа РАТАН-600 обеспечивается сверхмалощумящими неохлаждаемыми усилителями на основе НЕМТ-транзисторов (транзисторы с высокой подвижностью электронов). Все радиометры континуума РАТАН-600 являются приемниками прямого усиления СВЧ сигнала в заданной полосе частот с квадратичным детектированием для получения выходного сигнала. Стандартные параметры радиометрических комплексов представлены в Табл. 1, 2. Обозначения:  $f_0$  - центральная частота (ГГц),  $\Delta f$  - ширина полосы (ГГц),  $\Delta F$  - чувствительность по спектральной плотности потока на единицу элемента разрешения (мЯн/луч),  $HPBW_a$  - ширина диаграммы направленности (антенны) по уровню половинной мощности для склонений  $\delta \sim 42^\circ$ , AR - угловое разрешение для склонений  $\delta \sim 42^\circ$ .

На сегодняшний день, используются следующие радиометрические комплексы и соответствующие им методы измерения спектральной плотности потока радиоизлучения космических объектов:

1. Радиометры континуума вторичного зеркала №1 (Северный сектор) в диапазоне от 1.25 до 22.3 ГГц (Табл. 1) с ширинами полос от 4% (на дм волнах) до 10 – 12% относительно центральной частоты (Рис. 3).

2. Радиометры континуума вторичного зеркала №2 (Южный сектор с Плоским отражателем) в диапазоне от 4.7 до 22.3 ГГц (Табл. 2) с ширинами полос от 4% (на дм волнах) до 10 – 12% относительно центральной частоты (Рис. 4).

Для ежедневного мониторинга радиоисточников через неподвижную ДН использовалась стандартная методика измерений на РАТАН-600 [52]. Режим работы всех приемников - "радиометр полной мощности" [53]. Сбор данных осуществляется штатной универсальной системой регистрации, основанной на новой аппаратно-программной подсистеме ER-DAS (Embedded Radiometric Data Acquisition System) [54].

Угловое разрешение радиотелескопа зависит от высоты установки антенны. Его значение по склонению в три-четыре раза хуже, чем по прямому восхождению, из-за ножевой формы диаграммы направленности [55].

Предел обнаружения радиотелескопа около 5 мЯн (время накопления 3 сек) на 4.7 ГГц на средних углах при оптимальных условиях.

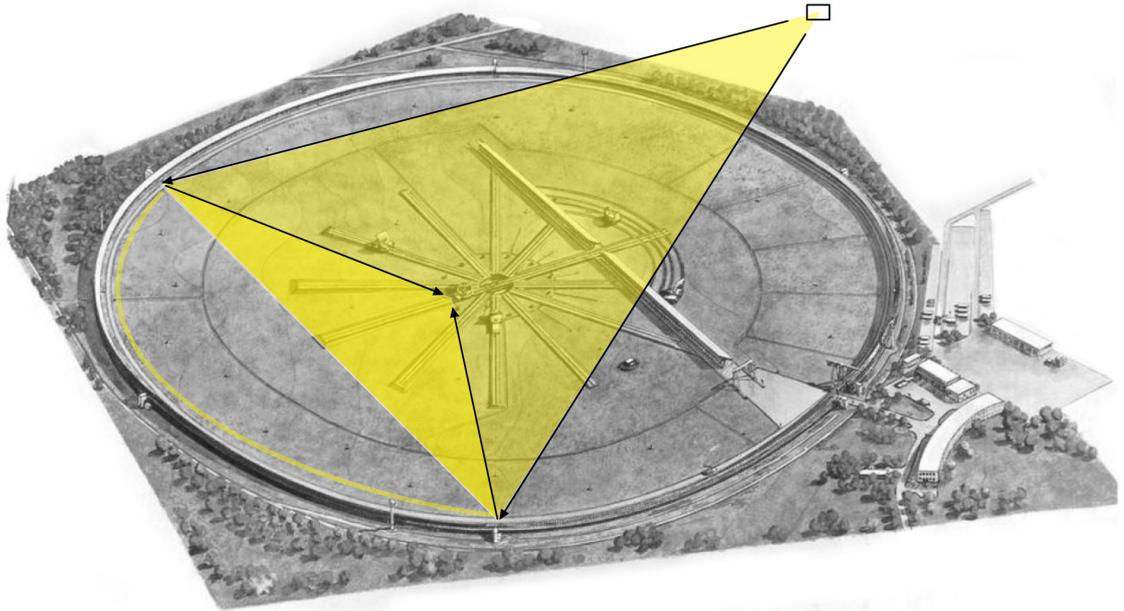


Рисунок 3 — Схематичное представление работы антенны в режиме "Северный сектор"

Таблица 1 — Параметры радиометров континуума вторичного зеркала №1.

| $f_0$ (ГГц) | $\Delta f$ (ГГц) | $\Delta F$ (мЯн/луч) | HPBW <sub>x</sub> сек | AR угл. сек |
|-------------|------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| 22.3*       | 2.5              | 50                   | 1.0                   | 11          |
| 21.7        | 2.5              | 50                   | 1.0                   | 11          |
| 14.4*       | 2.0              | 25                   | 1.1                   | 13          |
| 11.2        | 1.4              | 15                   | 1.4                   | 15.5        |
| 8.2         | 1.0              | 10                   | 2.0                   | 22          |
| 4.7         | 0.6              | 5                    | 3.2                   | 35          |
| 2.25        | 0.08             | 40                   | 7.2                   | 80          |
| 1.28        | 0.06             | 200                  | 10                    | 110         |

\* - радиометр введен в тестовую эксплуатацию с 2022 г.

Пределы изменения меняются по высоте от  $3.5^\circ$  до  $97^\circ$  (то есть возможен "зенитный" режим). Фокусное расстояние при этом меняется от 155 м от центра круга (фокусное расстояние, измеряемое от антенны, равно  $f = 288 - 155 = 133$  м), до 40 м от центра ( $f = 288 + 40 = 328$  м). При этом существенно меняется безаберрационная зона ВЗ: чем больше фокусное расстояние, тем меньше искажается фокальное "изображение" источника. Благодаря таким особенностям геометрии антенн РАТАН-600, спектральную плотность потока источника можно измерять в одном положении антенны на Северном или Южном секторах, во всём диапазоне от 1.25 до 22.3 ГГц в течение 1–2 минут.

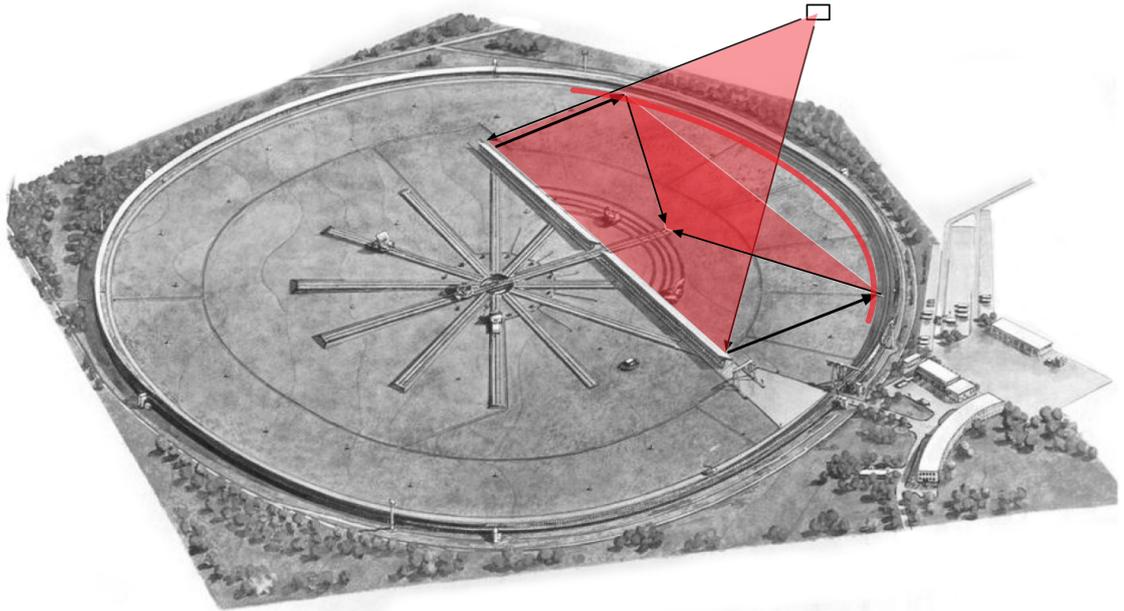


Рисунок 4 — Схематичное представление работы антенны в режиме "Южный сектор с Плоским отражателем"

Таблица 2 — Параметры радиометров континуума вторичного зеркала №2.

| $f_0$ (ГГц) | $\Delta f$ (ГГц) | $\Delta F$ (мЯн/луч) | HPBW <sub>x</sub> сек | AR угл. сек |
|-------------|------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| 22.3*       | 2.5              | 95                   | 1.5                   | 16.5        |
| 21.7        | 2.5              | 95                   | 1.5                   | 16.5        |
| 14.4*       | 2.0              | 50                   | 1.6                   | 18          |
| 11.2        | 1.0              | 30                   | 2.1                   | 23          |
| 8.2*        | 1.0              | 20                   | 2.7                   | 30          |
| 4.7         | 0.6              | 10                   | 4.8                   | 53          |
| 2.25        | 0.08             | 80                   | 11                    | 121         |

\* - радиометр введен в тестовую эксплуатацию с 2022 г.

Доступны следующие диапазоны склонений источников:

1. Северный сектор:  $-42^\circ < DEC < 50^\circ$  (на низких склонениях необходимо использовать режим "неподвижного" фокуса).
2. Южный сектор: в верхней кульминации:  $72^\circ < DEC < 90^\circ$ , в нижней кульминации:  $49^\circ < DEC < 90^\circ$ .
3. Южный сектор с Плоским отражателем:  $-42^\circ < DEC < 71^\circ$ . Объекты с  $DEC > 71^\circ$  можно наблюдать только в режиме Южного сектора.

## 1.2 Режим многоазимутальных наблюдений

Измерения в режиме многоазимутальных (МА) наблюдений проводились на трехзеркальной антенной системе "Южный сектор с Плоским отражателем" 5. В такой конфигурации антенны можно следить за космическим источником, изменяя азимут параболического Южного сектора в пределах  $\pm 30^\circ$ , высоту наклона плоского зеркала и азимут ВЗ в пределах  $\pm 30^\circ$ .

ВЗ можно относительно быстро перемещать по дуговым рельсам радиусом около 150 м, благодаря чему можно менять азимут фокуса антенны и следить за источником на небе. В 2018 году для реализации МА наблюдений, в фокальной плоскости ВЗ были установлены три радиометра в диапазоне частот 4.7, 8.6 и 16 ГГц (Табл. 3).

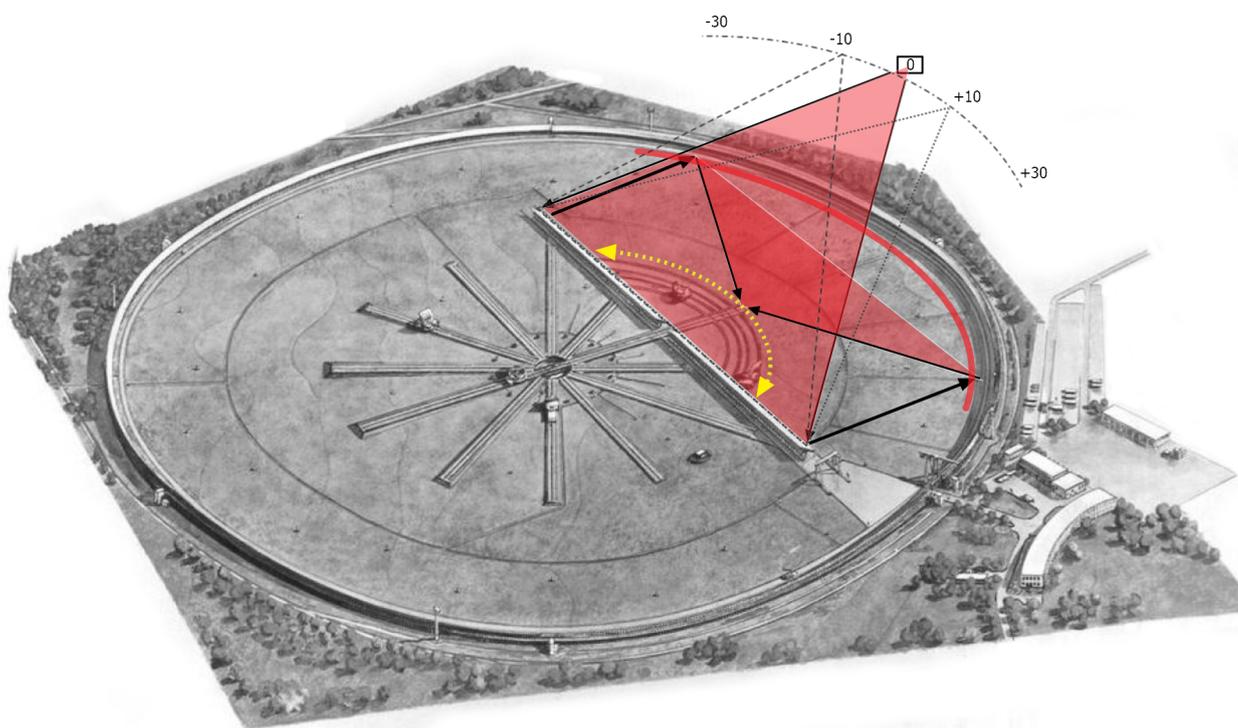


Рисунок 5 — Схематичное представление работы антенны в режиме многоазимутальных измерений

В режиме МА наблюдений дискретная установка антенны с шагом  $2^\circ$  по азимуту обеспечивала 31 измерение объекта, что в случае Лебедь X-3 равнялось интервалу в 10 минут между измерениями. В МА режиме наблюдений частоту измерений можно увеличить до 63 с интервалом  $\sim 5$  минут. Расчет видимых мест источников осуществлялся с помощью эфемеридной программы EFRAT, созданной в ГАО РАН специально для использования на телескопе

Таблица 3 — Параметры радиометров континуума вторичного зеркала №3

| $f_0$ , ГГц | $\Delta f$ , ГГц | $\Delta F$ , мЯн/луч | НРВW <sub>x</sub> , сек |
|-------------|------------------|----------------------|-------------------------|
| 30          | 5.0              | 200                  | 11                      |
| 16*         | 5.0              | 200                  | 11                      |
| 8.2         | 1.0              | 20                   | 30                      |
| 8.6*        | 1.0              | 20                   | 30                      |
| 4.7         | 0.6              | 10                   | 53                      |

\* - радиометры выведены из эксплуатации в 2020 г.

РАТАН-600 [56]. Рабочая программа EFRAT доступна на сервере РАТАН-600 и постоянно применяется для солнечных измерений и для измерений планет Солнечной системы.

В июне 2019 года в фокальной плоскости ВЗ был временно установлен один из радиометров на частоте 4.7 ГГц четырехлучевого комплекса четырехканальных чувствительных приемников, работающих в режиме полной мощности и применяемых для быстрой радиометрии на вторичном зеркале №5 (Рис. 6).



Рисунок 6 — Четырёхканальный радиометрический комплекс

Широкая полоса 600 МГц каждого радиометра была разделена на четыре узких субполосы по 150 МГц. На выходе каждого узкого канала после квадратичного детектора были установлены АЦП для регистрации цифровых сигналов. Регистрация ведется в режиме "радиометра полной мощности" так

Таблица 4 — Параметры четырёхканального радиометрического комплекса.

| $f_0$ , ГГц | $\Delta f$ , ГГц | $\Delta F$ , мЯн/луч | HPBW <sub>x</sub> , сек | AR, угл.сек |
|-------------|------------------|----------------------|-------------------------|-------------|
| 4.40-4.55   | 0.15             | 10                   | 3.2                     | 35          |
| 4.55-4.70   | 0.15             | 10                   | 3.2                     | 35          |
| 4.70-4.85   | 0.15             | 10                   | 3.2                     | 35          |
| 4.85-5.00   | 0.15             | 10                   | 3.2                     | 35          |

что радиометрический комплекс представляем собой 16 независимых радиометров. Благодаря разделению полосы 600 МГц на четыре субполосы, можно измерять дисперсию радиоволн в межзвёздной среде. Наличие такой дисперсии является признаком далекого радиоисточника. Запись сигналов велась с помощью штатной системы регистрации с частотой 16384 отсчета в секунду для каждого из 16 каналов. Четыре радиометра позволяют одновременно наблюдать четыре смежных участка неба, расширяя тем самым поле зрения в четыре раза. В режиме многоазимутальных измерений записи сигналов в узких каналах радиометра усреднялись в процессе обработки наблюдений. Четырёхканальный радиометр на частоте 4.7 ГГц обладает более высокой чувствительностью в широкой полосе частот (Табл. 4).

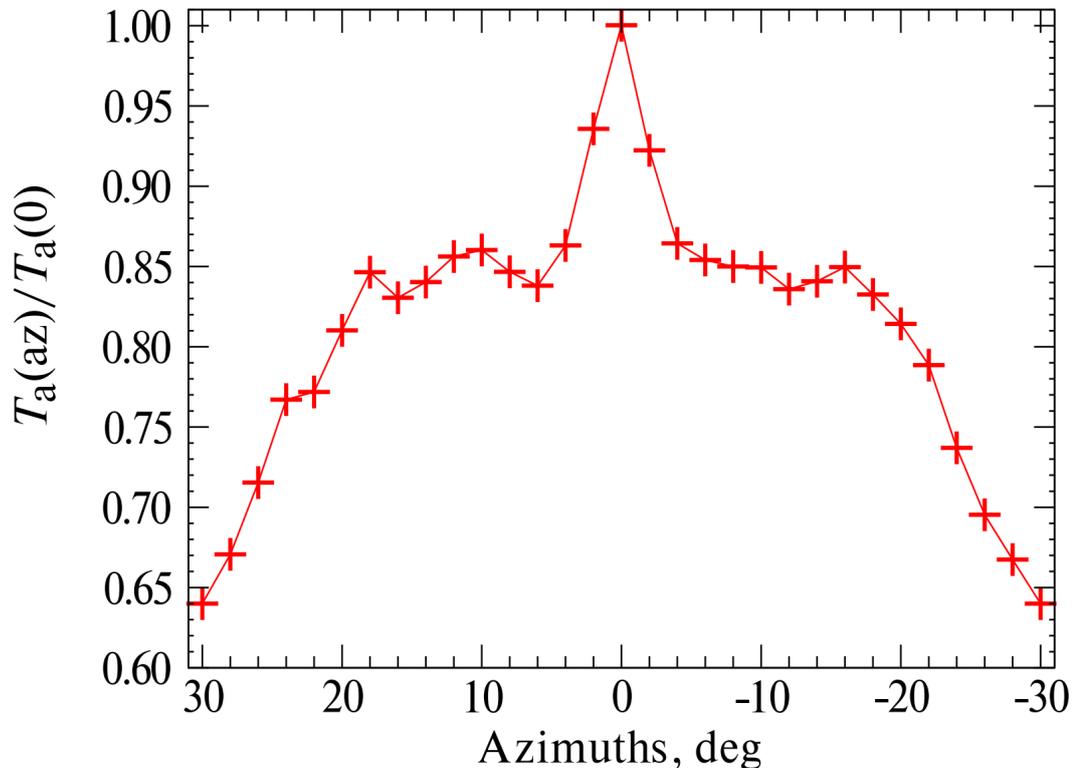


Рисунок 7 — Зависимость нормированных антенных температур источника NGC 7027 от азимута антенной системы "Южный сектор с Плоским отражателем".

Основные параметры антенны МА режима (эффективная площадь и размер луча) были измерены в наблюдениях калибровочных источников (Рис. 7 и 8). Эффективность антенны заметно падает на крайних азимутах из-за уменьшения апертуры Южного сектора, которая ограничена четвертью ГЗ телескопа РАТАН-600. Размер луча по траектории прохождения источника через неподвижную ДН менялся вследствие изменения параллактического угла. Вертикальный размер луча также менялся от  $37'$  в меридиане, до  $50'$  в азимутах  $\pm 30^\circ$ .

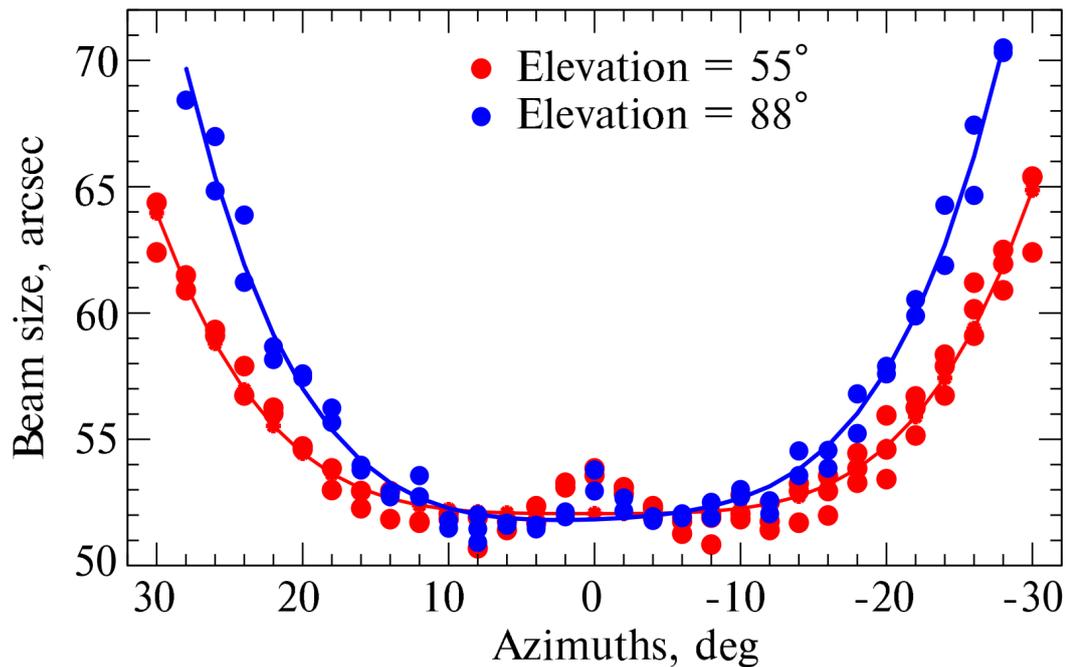


Рисунок 8 — Размер сечений луча многоазимутальной антенной системы "Южный сектор с Плоским отражателем" для источников на двух разных высотах.

### 1.3 Методы обработки файлов кривых прохождений и калибровки по плотности потока опорных источников

Обработка записей наблюдений проводилась с помощью пакета FADPS [57]. В процессе обработки для увеличения отношения сигнал/шум применялась свертка записей наблюдений с расчетной ДН РАТАН-600 или с кривыми прохождения ярких опорных источников. Измерение амплитуды и полуширины источников в записях кривых прохождения осуществлялось методом аппроксимации гауссианой [52].

Наблюдаемая спектральная плотность потока  $S_\nu$  определяется из соотношения:

$$S_\nu = \frac{2kT_{a,\nu}}{A_{\text{eff},\nu}(h)} = g_\nu(h) \times T_{a,\nu} \quad (1)$$

где  $T_{a,\nu}$  — антенная температура,  $k$  — постоянная Больцмана,  $g_\nu(h)$  — коэффициент, учитывающий изменение эффективной площади антенны  $A_{\text{eff},\nu}$  с высотой  $h$ .

Таким образом, вся процедура расчёта плотности потока излучения исследуемого объекта сводится к следующему соотношению:

$$S_{\nu,\text{mqso}} = \frac{S_{\nu,\text{опора}}}{T_{a,\text{опора}}} \times T_{a,\text{mqso}} = T_{a,\text{mqso}} \times g_\nu \quad (2)$$

где  $S_\nu$  — плотность потока излучения [Ян] на частоте  $\nu$ ;  
 $T_a$  — антенная температура [мК];  
 $g_\nu$  — калибровочный коэффициент [Ян/мК];  
 mqso — для микроквара;  
 орога — для калибровочного источника.

Калибровка амплитуды исследуемых объектов осуществляется на основании известных плотностей потока излучения калибровочных радиоисточников. В Табл. 5 представлены потоки вторичных калибровочных источников (см. [48], [47], [58]).

Из отношения плотности потока излучения опорного источника к его наблюдаемой антенной температуре определяется калибровочный коэффициент. Произведение калибровочного коэффициента и антенной температуры источника даёт спектральную плотность потока излучения в янских, где

Таблица 5 — Принятые значения спектральных плотностей потоков  $S_\nu$  (в Ян) источников, использовавшихся для калибровки

| Источник   | $S_{1.25 \text{ ГГц}}$ | $S_{2.25 \text{ ГГц}}$ | $S_{4.7 \text{ ГГц}}$ | $S_{8.2 \text{ ГГц}}$ | $S_{11.2 \text{ ГГц}}$ | $S_{22.3 \text{ ГГц}}$ | $S_{30 \text{ ГГц}}$ |
|------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 1347+12    | 5.95                   | 4.44                   | 2.99                  | 2.13                  | 1.75                   | 1.12                   | 1.11                 |
| 1850-01    | 1.32                   | 2.24                   | 3.30                  | 3.94                  | 4.19                   | 4.49                   | 4.11                 |
| 2107+42    | 1.17                   | 3.27                   | 5.39                  | 5.79                  | 5.79                   | 5.45                   | 5.29                 |
| 1458+71    | 8.28                   | 5.41                   | 3.20                  | 2.16                  | 1.73                   | 1.02                   | 0.82                 |
| Отн.ошибка | $\sim 10\%$            | 5 – 10%                | 3 – 5%                | 3 – 6%                | 4 – 6%                 | $\sim 10\%$            | $\sim 10\%$          |

1 Ян =  $10^{-26}$  Вт/(м<sup>2</sup>·Гц). В рамках наблюдательной программы "Мониторинг микроквазаров — галактических рентгеновских двойных звезд со струйными выбросами" (Трушкин С.А.) опорные источники и микроквазары наблюдаются ежедневно на одной и той же приёмной аппаратуре, а для калибровки используются данные измерений в тот же или ближайший день. Калибровочный коэффициент рассчитывается отдельно для каждой частоты за текущие сутки. Таким образом, удаётся достичь максимальной точности определения плотности потока излучения для построения кривых блеска и радиоспектров.

Таблица 6 — Многоазимутальные измерения калибровочных источников в 2019–2021 годах

| Даты наблюдений                     | MJD         | Опорные источники |
|-------------------------------------|-------------|-------------------|
| Апрель 19–28, 2019                  | 58592–58601 | DR 21+3C 84       |
| Июнь 6–8, 2019; Jun. 10, 2019       | 58640–58644 | DR 21+3C 84       |
| Июнь 18–29, 2019                    | 58652–58666 | DR 21+3C 84       |
| Февраль 5–9, 2020; Feb. 15–17, 2020 | 58884–58896 | NGC 7027          |
| Декабрь 25–30, 2021                 | 59573–59579 | NGC 7027          |

Калибровка плотности потока в МА режиме была выполнена в наблюдениях яркой радиогалактики NGC1275 (3C84, J0319+41), планетарной туманности NGC 7027 (J2107+42) и H II области DR21 (J2039+42). Наблюдения калибровочных источников на близких склонениях проводились аналогично наблюдениям исследуемого микроквазара, что давало точную калибровку по потоку и обеспечивало контроль характеристик антенны в разных азимутах. Калибровочные источники наблюдались несколько раз в течение всего цикла внутрисуточных наблюдений. Потоки NGC 7027 и DR21 были приняты в соответствии с прецизионными измерениями и с учётом векового падения потока из-за расширения оболочки NGC 7027 [58]. Опыт наблюдений опорных источников показывает, что общая точность привязки по плотности потока не хуже 3%.

В сводной Табл. 6 приведены даты многоазимутальных измерений Cygnus X-3, а также указаны опорные источники, использовавшиеся в наблюдениях. Для перечисленных в Табл. 6 интервалов дат программа мониторинга Cygnus X-3 на Северном секторе шла ежедневно.

Точность измерений потоков выше 1 Ян была лучше 3% на 4.7 ГГц и в пределах 5 – 10% на частотах 8.6 и 16 ГГц. На графиках вариаций спектрального индекса ошибка его определения была не выше  $\pm 0.05$ . Высокая точность измерений на частоте 4.7 ГГц была обеспечена высокими значениями потоков во время вспышек, то есть сигнал превышал шумы системы в десятки раз. Поэтому на графиках кривых блеска "усы" ошибок были меньше размеров значков значений потока.

#### 1.4 Метод анализа временных рядов

Метод Ломба-Скаргла является мощным инструментом для анализа временных рядов с нерегулярными интервалами времени. Он используется для выявления периодических сигналов в данных, что особенно полезно в астрономии и других научных областях [59], [60].

Периодограмма Ломба-Скаргла вычисляется для выявления периодических сигналов. Для этого вводится понятие угловых частот  $\omega$ , которые связаны с частотами  $f$  следующим образом:

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

Периодограмма Ломба-Скаргла  $P(\omega)$  вычисляется по формуле:

$$P(\omega) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\left( \sum_{j=1}^N y_j \cos \omega(t_j - \tau) \right)^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left( \sum_{j=1}^N y_j \sin \omega(t_j - \tau) \right)^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right] \quad (4)$$

где  $\tau$  определяется как:

$$\operatorname{tg}(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^N \sin 2\omega t_j}{\sum_{j=1}^N \cos 2\omega t_j} \quad (5)$$

С помощью этой формулы можно определить силу сигнала на каждой частоте  $\omega$ . После вычисления периодограммы необходимо определить, какие пики являются значимыми. Это делается с помощью вероятности ложной тревоги (False Alarm Probability). Уровень значимости  $P_{\text{threshold}}$  рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{threshold}} = -\log \left( 1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{N}} \right) \quad (6)$$

где:

- $\alpha$  – заданный уровень значимости.
- $N$  – количество временных точек в наборе данных.

Этот пороговый уровень мощности помогает определить, какие пики на периодограмме являются результатом случайного шума.

## Глава 2. Результаты многоволновых исследований микроквазаров

### 2.1 SS 433

#### 2.1.1 Введение

В 1970-е годы английские астрофизики Д. Кларк и П. Мурдин искали звездные остатки взрывов сверхновых звезд (ОСН). Они обнаружили переменный рентгеновский и радиоисточник - A1910 + 04 вблизи центра остатка сверхновой W50 в созвездии Орла, с нетипичным оптическим спектром. Впоследствии объект был отождествлён со звездой класса А под номером 433 из каталога ярких эмиссионных звезд (LS) Б. Стефенсона и Н. Сандулека (1977), а также как радиоисточник из 4С-каталога (четвертый Кембриджский радиообзор на волне 178 МГц), опубликованный в 1967 г. Оптический спектр с переменными эмиссионными линиями водорода и нейтрального гелия был объяснён посредством модели двойного СВ, где оптическое излучение происходит в прецессирующих струях, движущихся от центра системы со скоростью 78 000 км/с. Впервые астрономические исследования указали на возможность ускорения сгустков вещества до скоростей близких к скорости света. В конце 1978 года, британский астрофизик М. Райл с коллегами сформулировали гипотезу, что затменная рентгеновская двойная система SS433 – это новый тип радиозвезд. Наблюдательные проявления системы SS 433 очень напоминали внегалактические объекты, подобные блазару в созвездии Ящерицы (BL Lac). Если бы в Галактике был найден такой источник (струя которого направлена точно в сторону Земли), он бы показывал очень высокую яркость за счет релятивистского усиления потока, а сама яркость менялась бы в течение нескольких секунд. Расчеты с применением формул специальной теории относительности указывали на то, что принимаемое излучение от синхротронного источника, который движется на наблюдателя, должно усиливаться вследствие эффекта Доплера. Действительно, такие наблюдательные проявления характерны для внегалактических источников, джет которых направлен прямо на наблюдателя. Вероятность обнаружить такой объект в нашей Галактике, струя которого была бы направлена строго на наблюдателя, крайне мала в выборке и без того редких объектов. В 1981 г. выдающимся американским радиоастрономом Р. Джелмин-

гом был впервые картографирован SS 433 с помощью интерферометра VLA. На радиокартах SS 433 была обнаружена переменная яркость струеобразной структуры, прецессирующей с периодом 164 дня. SS 433 стал первым галактическим объектом, в котором были обнаружены СВ. Затем, американским астрофизиком Б. Маргоном с коллегами была предложена кинематическая модель прецессирующих струй, в которых происходит движение, излучающих подвижные эмиссионные линии, вещества. Результаты моделирования точно совпали с наблюдательными проявлениями данной системы. В 1988 г. Р. Джелминг написал обзор “Радиозвезды” во втором издании классического труда сотрудников НРАО “Галактическая и внегалактическая радиоастрономия”, где были детально описаны не только наблюдательные данные рентгеновских двойных звёзд, но и приведены теоретические выкладки по механизмам радиоизлучения звёзд и РДС. В том же году Р. Джелминг и К. Джонсон предложили численную модель радиоизлучения струй в SS 433, основанную на генерации синхротронного излучения релятивистских частиц внутри движущихся по баллистической траектории сгустков. Картина полностью соответствовала наблюдательным проявлениям системы SS 433, обнаруженным на VLA в 1981 г., а модель полых расширяющихся (в начале расширения оптически толстых, а потом оптически тонких) прецессирующих струй стала наиболее точной моделью как для системы SS 433, так и для других микроквazarов.

SS 433 представляет собой уникальную РДС, которая демонстрирует удивительно стабильный и чрезвычайно высокий непрерывный сверхэддингтоновский темп аккреции массы. Это проявляется в виде мощных оттоков вещества как в форме ветра аккреционного диска, так и в виде коллимированных СВ [61]. SS 433 расположена в центре остатка сверхновой W50, который имеет характерную форму с двумя протяженными компонентами, предположительно сформированными под воздействием прецессирующих струй [62]. Возраст W50 оценивается примерно в 20 000 лет [63]. Система состоит из ЧД [64] и оптической звезды спектрального класса A3 -A7 I [65], [66]. Масса оптической звезды оценивается в диапазоне  $8.3 - 12.7 M_{\odot}$ , а масса компактного объекта ограничена значениями  $1.25 - 1.65 M_{\odot}$  [67], [68].

Расстояние до системы хорошо определено методами радиоинтерферометрии и составляет  $5.12 \pm 0.27$  кпк [69]. SS 433 является затменной системой с орбитальным периодом 13.082 дня [70]. Оптическая звезда переполняет свою полость Роша, что приводит к интенсивному перетеканию вещества на

компактный объект. Уникальной особенностью SS 433 является наличие сверхкритического аккреционного диска, темп аккреции в котором оценивается на уровне  $\sim 10^{-4}M_{\odot}$  в год, что значительно превышает эддингтоновский предел [2]. Такой высокий темп аккреции приводит к формированию мощного ветра от диска, играющего ключевую роль в энергетике системы и влияющего на структуру и динамику непрерывно истекающих струй, скорость которых составляет 0.26c (см. работу Фабрики С.Н. [61]).

Одной из наиболее примечательных особенностей SS 433 является прецессия аккреционного диска и струй с периодом 162 дня [71]. Ось прецессии наклонена к лучу зрения под углом  $78^{\circ}$ , а половина угла конуса прецессии составляет  $21^{\circ}$  [72]. Это приводит к периодическим изменениям доплеровского смещения линий в спектрах струй, которые описываются кинематической моделью [73], [74]. Система известна своей долговременной стабильностью параметров кинематической модели, описывающей движение струй. Однако при этом SS 433 также проявляет значительную переменность на различных временных масштабах и в различных диапазонах длин волн. Помимо орбитальной и прецессионной периодичности, наблюдаются квазипериодические колебания с периодом 6.28 дня, связанные с нутацией диска [75], а также нерегулярные вспышки в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах [76].

Несмотря на интенсивные исследования на протяжении более 40 лет, многие аспекты физики SS 433 остаются неясными. Остаются открытыми вопросы о механизмах формирования и коллимации релятивистских струй, природе сверхкритической аккреции и причинах вспышечной активности. Важным элементом изучения вспышек SS 433 является их многоволновая природа. Координированные наблюдения в различных диапазонах длин волн могут предоставить ключевую информацию о физических процессах, вызывающих эти события, и о взаимосвязи между различными компонентами системы. Особый интерес представляют эпизоды повышенной активности системы, которые проявляются в виде мощных вспышек в оптическом и радиодиапазонах. Эти вспышки часто сопровождаются изменениями в рентгеновском излучении и могут указывать на существенные перестройки в структуре аккреционного течения и струй.

В рентгеновском диапазоне излучение SS 433 характеризуется наличием как непрерывного спектра, так и ярких эмиссионных линий, связанных с релятивистскими струями. Наиболее заметными являются линии высокоиони-

зованного железа (Fe XXV и Fe XXVI), которые испытывают доплеровское смещение в соответствии с кинематической моделью [77]. Рентгеновское излучение системы также демонстрирует орбитальную модуляцию, связанную с затмениями и поглощением в ветре оптической звезды [78]. Рентгеновское поведение SS 433 во время вспышек менее изучено из-за сложности организации своевременных наблюдений. Однако имеющиеся данные указывают на возможные изменения в структуре аккреционного течения и струй во время этих событий [79].

В оптическом диапазоне SS 433 демонстрирует сложную кривую блеска, на которую накладываются орбитальные затмения, прецессионная переменность и нерегулярные вспышки. Амплитуда орбитальных затмений достигает 1.5 звездной величины в V-полосе [80]. Прецессионные изменения блеска связаны с переменным вкладом аккреционного диска и имеют амплитуду около 0.5 звездной величины [81]. Периоды ярких вспышек в системе SS 433 проявляются как увеличение блеска системы на 0.5-1 звездную величину [80]. Эти события часто сопровождаются изменениями в профилях эмиссионных линий, в частности, может наблюдаться усиление или ослабление подвижных линий, связанных со струями [81].

Радиоизлучение SS 433 характеризуется наличием как постоянного компонента, связанного с протяженными струями, так и переменного компонента, ассоциируемого с компактным источником. Система демонстрирует регулярные радиовспышки с амплитудой до нескольких Ян, которые часто коррелируют с активностью в других диапазонах [42]. В радиоинтерферометрических наблюдениях была детально изучена морфология и кинематика СВ на малых угловых масштабах [82]. Вспышки в радиодиапазоне SS 433 характеризуются резким увеличением потока, которое может достигать десятикратного превышения над уровнем спокойного состояния [76]. Радиовспышки часто имеют сложную временную структуру и могут длиться от нескольких дней до недель. Они обычно классифицируются на два типа [69]:

1. Вспышки типа I, характеризующиеся одновременным увеличением потока на всех частотах с относительно плоским спектром.
2. Вспышки типа II, демонстрирующие пик на частотах ниже 1 ГГц, который затем постепенно смещается к более низким частотам в течение нескольких дней [83].

Считается, что для вспышек типа I характерно усиление излучения центральной машины, что связывается с ускорением темпа потери массы через ветер, в то время как вспышки типа II ассоциируются с расширяющимися плазмонами в струях, и указывают на дискретные выбросы вещества в дже-тах [84]. Остаются открытыми вопросы о механизмах запуска и коллимации релятивистских струй, природе вспышечной активности, а также о деталях взаимодействия между различными компонентами системы - оптической звездой, аккреционным диском, ветром и струями. Одной из нерешенных проблем остается механизм, вызывающий яркие вспышки. Предложены различные модели, включая нестабильности в аккреционном диске, взаимодействие струй с окружающей средой, изменения в темпе переноса массы от оптической звезды и другие [85]. Однако ни одна из этих моделей пока не может полностью объяснить все наблюдаемые характеристики вспышек [86].

В совместном многоволновом исследовании Бланделл и др. [86] был подробно описан сценарий эволюции излучения на длительном временном интервале вокруг гигантской вспышки. Данные получены в серии одновременных спектральных измерений в оптическом и радиодиапазонах, проведенных с августа по ноябрь 2004 года на 3,5-метровом телескопе New Technology Telescope (NTT) и в широком радиодиапазоне на телескопе РАТАН-600. Одним из ключевых результатов исследования стало четкое обнаружение аккреционного диска SS 433 в оптическом диапазоне. Хотя предыдущие исследования (например, [87]; [88]) предоставляли некоторые свидетельства существования аккреционного диска, данная работа впервые представила его однозначную идентификацию в оптическом спектре. Авторы обнаружили пару широко разнесенных эмиссионных линий  $H_{\alpha}$ , которые интерпретировали как излучение от противоположных краев быстро вращающегося аккреционного диска.

Сценарий развития вспышки в SS 433, описанный в [86] начинается с предполагаемого поступления дополнительного вещества от оптической звезды в аккреционный диск. Авторы зафиксировали, что аккреционный диск стал видимым примерно за 10 дней до радиовспышки, а интенсивность ветра постепенно возросла. Это привело к проявлению широко разнесенных компонент линии  $H_{\alpha}$  от диска на день +288 (здесь и далее дни отсчитываются от MJD 53000) и увеличению скорости его вращения с 500 до 700 км/с в течение следующих 20 дней. Это увеличение скорости вращения может указывать на изменения в структуре диска. Уже спустя три дня (день +291) начинается быстрое уве-

личение и скорости ветра от диска, достигающее удвоения до 1000 км/с (к дню +294). Это усиление ветра предшествовало началу основной вспышки и может быть связано с увеличением темпа аккреции на компактный объект. Авторы подчеркивают важность не только джетов, но и ветра от аккреционного диска как значимого механизма переноса массы. Они ссылаются на предыдущие работы (см. [89], [90]), которые показали, что ветер от диска может быть доминирующим режимом потери массы в этой системе. Со скоростью ветра резко начинает возрастать и скорость струй (до  $0.28c$ ), а также усиливается интенсивность их оптических линий. Радиовспышка на 4.8 ГГц по данным РАТАН-600 начинается на день +296, достигая пика на день +298, с более мощным вторым пиком между днями +300 и +302. После дня +302 интенсивность радиоизлучения падает, а оптические линии струй временно исчезают до дня +307. Радиоданные, полученные на телескопе РАТАН-600 [91], показали значительное увеличение потока на частоте 4.8 ГГц примерно через 5 дней после наблюдаемого усиления ветра и увеличения скорости джетов. Авторы отмечают, что наблюдаемое увеличение скорости джетов во время вспышки может быть связано с изменениями в процессе коллимации. Они предполагают, что усиление ветра от аккреционного диска может играть важную роль в формировании более узкого канала для выброса вещества, что приводит к увеличению скорости джетов.

Исследование также затрагивает вопрос о природе радиовспышек в SS 433. Обсуждается возможность существования двух типов радиовспышек, ранее предложенных в литературе (например, [92];[61]). Авторы выделяют два типа вспышек: тип I связан с усилением ветра от диска, тип II - с усилением выбросов в струях. В наблюдаемой вспышке проявились оба механизма последовательно. Отмечена связь высоких скоростей струй ( $> 0.29c$ ) с радиовспышками и отсутствие значимого увеличения рентгеновской светимости во время вспышки.

Авторы провели анализ архивных данных GBI (Green Bank Interferometer) и спектроскопических наблюдений, который показал, что всякий раз, когда измеренная скорость джета превышает  $0.29c$ , это совпадает или происходит в течение одного-двух дней с радиовспышкой. Это наблюдение подчеркивает тесную связь между кинематикой джетов и радиоизлучением системы [91]

После периода усиленной активности джетов, наблюдалось их временное исчезновение между днями +302 и +305. Подобное поведение - усиление, а затем исчезновение линий джетов - наблюдалось и в предыдущих исследованиях круп-

ных вспышек SS 433 (например, [93]; [74]). Обнаружение "предшествующего падения" или "гашения" интенсивности радиоизлучения непосредственно перед началом основной вспышки наблюдалось и в других микроквазарах, таких как Cygnus X-3 [91]. Авторы выдвинули предположение, что эта фаза гашения может быть связана с высокой непрозрачностью плазмон в радиодиапазоне на начальной стадии формирования выбросов.

Авторы также обратили внимание на временную задержку между вариациями в инфракрасном и радиодиапазонах [94]. Типичная задержка в 2 дня между ИК и радиовспышкой может быть объяснена расширением болидов джетов, которые переходят от оптически толстого к оптически тонкому состоянию на разных частотах в разное время. Это согласуется с моделью, в которой радиоизлучение генерируется на некотором расстоянии от центральной области системы [95], [96]).

Авторы отмечают периодичность вспышек: после основной наблюдались повторные радиовспышки на схожих орбитальных фазах с интервалом около одного орбитального периода, что согласуется с предыдущими наблюдениями [97]. Обсуждается возможная связь между орбитальной фазой и возникновением вспышек. Авторы отмечают, что наблюдаемая вспышка совпала с затмением, как и в некоторых предыдущих исследованиях [98].

Изучение SS 433 имеет важное значение не только для понимания физики этой уникальной системы, но и для более широкого круга астрофизических проблем, включая эволюцию тесных двойных звёзд, механизмы сверхкритической аккреции, формирование релятивистских струй в различных объектах (от микроквazarов до активных ядер галактик), а также взаимодействие этих струй с окружающей средой.

В контексте нерешённого вопроса о механизмах генерации релятивистских струйных выбросов, многоволновые исследования рентгеновской двойной системы S433 с опорой на многочастотные данные телескопа RATAN-600 представляют наибольший интерес и приближают к пониманию механизмов, отвечающих за формирование СВ.

### 2.1.2 Релятивистские выбросы в системе SS 433 летом 2018 года

Параметры релятивистских струйных выбросов SS 433 изучены с очень хорошей точностью, в первую очередь благодаря рентгеновской спектроскопии высокого разрешения в линиях высокоионизованных атомов тяжелых элементов [99]. Исключительная стабильность измеряемых параметров указывает на долговременную устойчивость механизмов запуска и коллимации струй вне зависимости от орбитальной или прецессионной фазы системы. В этой связи интересно попытаться выявить возможные отклонения в период катаклизмической активности системы, проявляющей себя в первую очередь в виде вспышек излучения в радио- и оптическом диапазоне.

17 июля 2018 года Горанский В.П. и др. опубликовали сообщение о наблюдениях яркой вспышки в системе SS 433. В оптическом диапазоне вспышка достигла максимальной яркости 11.7 звездной величины в полосе  $R_c$ . Это событие превзошло по яркости вспышку 26 июля 2014 года, ранее считавшуюся самой яркой из зарегистрированных. Как и предыдущая гигантская вспышка, новая произошла во время затмения, орбитальные фазы были между 0.95 и 0.97. 17 июля также был получен спектр с помощью 1-м телескопа САО и спектрографа UAGS с накоплением сигнала 4800 секунд, как раз в максимуме блеска. Линия  $H\alpha$  и эмиссионные линии He I определялись, как типичные для спокойного состояния системы SS 433 [100].

В рамках программы долгосрочного мониторинга микроквazarов на телескопе РАТАН-600, система SS 433 наблюдалась в диапазоне 2.3 - 21.7 ГГц в течение всего периода повышенной активности (. После трех недель спокойного состояния, 17 июля радиопоток увеличился в два-три раза в течение дня, достигнув 1.1 Ян на 4.7 ГГц (Рис. 9). Спектральный индекс составил  $-0.47$ , что является обычным значением при вспышках. Ниже приведены кривые блеска SS 433 по данным РАТАН-600.

25 августа 2018 года (MJD 58355.76) наблюдалась исторически ярчайшая радиовспышка в системе SS 433 (Рис. 9), в максимуме которой зарегистрировано десятикратное увеличение потока относительно уровня в спокойном состоянии на частоте 2.3 ГГц [101].

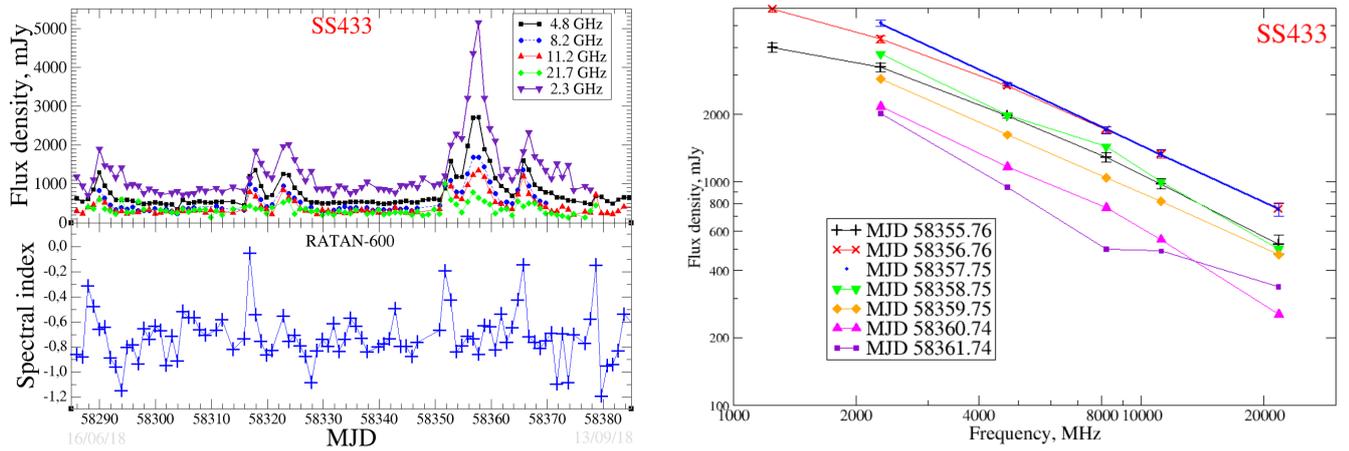


Рисунок 9 — Кривые блеска и вариации спектрального индекса (слева), радиоспектры ярчайшей вспышки (справа) в 2018 г.

Аналогичный спектр, наблюдался в октябре 2012 года [76]. На кривых блеска Swift/BAT<sup>1</sup> и MAXI<sup>2</sup> также наблюдались признаки активности. В период активного состояния системы, продолжавшегося более двух месяцев, в общей сложности было зарегистрировано несколько мощных вспышек, которые сопровождались вспышками оптического излучения. Некоторые события состояли из нескольких пиков. Первый пик связан с яркой оптической вспышкой, обнаруженной Горанским и др. [100], второй радиопик наблюдался в последующих наблюдениях на Swift/XRT Хабибуллиным и др [102].

В период с июля по август 2018 года была зарегистрирована целая серия выбросов, а также мощнейшая за всю историю наблюдений радиовспышка в системе [101]. Наблюдения проводились в рамках программы долговременного мониторинга на радиотелескопе РАТАН-600, которая представляет собой почти ежедневные наблюдения ярких микроквazarов на частотах 2.3, 4.7, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц [103]. Благодаря одновременным (в пределах 1–2 мин) измерениям плотности потока на всех частотах в таких наблюдениях, становится возможным анализировать изменения спектральных индексов радиоизлучения день ото дня.

С июля по август 2018 г. было зарегистрировано в общей сложности четыре мощных радиовспышки от SS 433, третья из которых оказалась самой мощной за всю историю наблюдений системы (Рис. 9). В максимуме этой вспышки, произошедшей 25 августа 2018 года, поток превышал уровень спокойного состояния почти в десять раз. Спектр в максимуме хорошо аппроксимировался

<sup>1</sup><https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/SS433/>

<sup>2</sup>[http://maxi.riken.jp/star\\_data/J1911+049/J1911+049.html](http://maxi.riken.jp/star_data/J1911+049/J1911+049.html)

степенным законом со спектральным индексом  $-0.85$  во всем диапазоне частот от 2.3 до 22 ГГц [101].

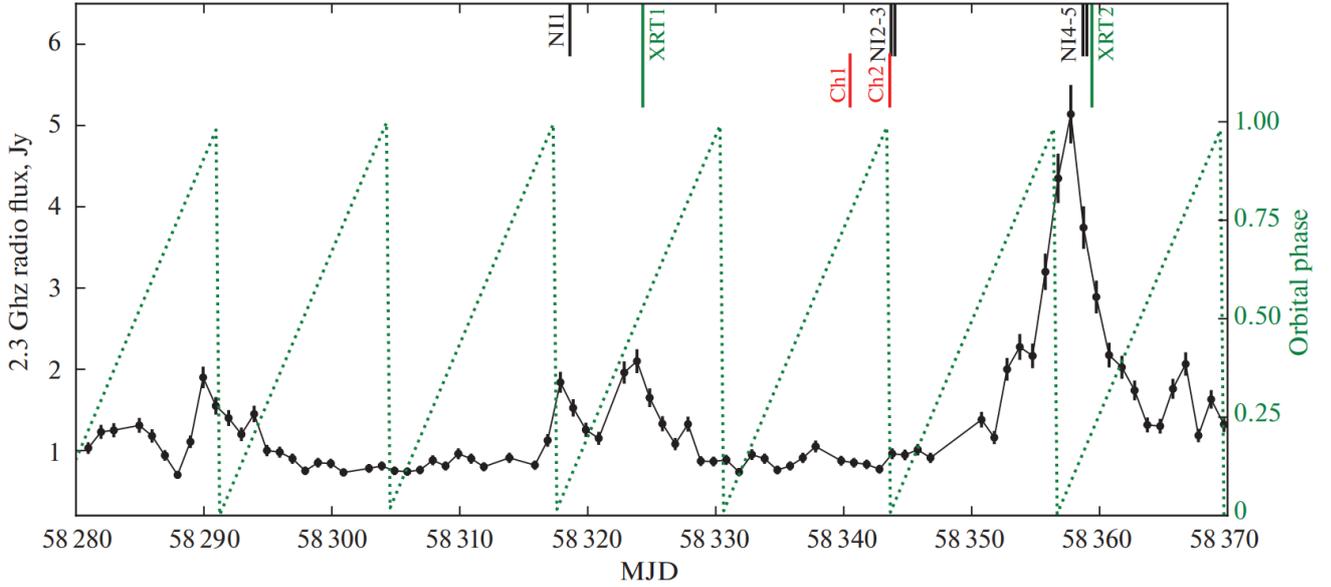


Рисунок 10 — Долговременная кривая блеска по данным РАТАН-600 на частоте 2.3 ГГц. В верхней части рисунка черточками указано время наблюдений рентгеновских телескопов: черным — NICER, красными — Chandra, зелеными — Swift/XRT. По правой оси (зеленым пунктиром) отложена орбитальная фаза [22]

В этот же период проведена серия рентгеновских наблюдений SS 433 в рамках алертной программы ToO (Target of Opportunity), триггером для которой служили вспышки в оптическом (для наблюдения XRT1, см. [102]) и радиодиапазонах (для XRT2, см. [100]). Первое наблюдение Swift/XRT (XRT1) было проведено 25 июля 2018 года, через 7.534 дня после регистрации оптической вспышки. Наблюдение состояло из двух сегментов с общим временем экспозиции 1031 секунду в режиме счёта фотонов (Photon Counting mode). Источник детектировался Swift/XRT со средним темпом счёта  $0.48 \pm 0.02$  отсчёты/сек в диапазоне 0.3–10 кэВ [22].

Второе наблюдение Swift/XRT (XRT2) было проведено 29 августа 2018 года, через 2 дня после пика экстремальной радиовспышки. Общее время чистой экспозиции составило 1189 сек. Средняя скорость счёта от источника составила  $0.50 \pm 0.02$  отсчёты/сек в диапазоне энергий 0.5–10 кэВ [22].

В период с 10 по 14 августа 2018 года, за 17-14 дней до пика радиопотока во время ярчайшей из четырех зарегистрированных радиовспышек, были проведены наблюдения SS 433 космической обсерваторией Chandra с использованием прибора ACIS (Advanced CCD Imaging Spectrometer) в сочетании с

Таблица 7 — Журнал рентгеновских наблюдений SS 433 в период активности в 2018 г. [22]

| Телескоп            | Дата       | Эксп. (сек) | MJD     | $\varphi$ | $\psi$ | $z_{eph}^w$ | $z_{eph}^e$ |
|---------------------|------------|-------------|---------|-----------|--------|-------------|-------------|
| NICER (N1)          | 2018-07-19 | 1144        | 58318.6 | 0.095     | 0.277  | -0.000      | 0.069       |
| Swift/XRT (XRT1)    | 2018-07-25 | 1031        | 58324.3 | 0.529     | 0.312  | 0.018       | 0.051       |
| Chandra/HETGS (Ch1) | 2018-08-10 | 18617       | 58340.5 | 0.768     | 0.412  | 0.059       | 0.010       |
| Chandra/HETGS (Ch2) | 2018-08-10 | 94292       | 58343.6 | 0.007     | 0.431  | 0.064       | 0.005       |
| NICER (N2)          | 2018-08-13 | 11660       | 58343.7 | 0.008     | 0.431  | 0.064       | 0.005       |
| NICER (N3)          | 2018-08-14 | 24159       | 58344.0 | 0.037     | 0.434  | 0.065       | 0.004       |
| NICER (N4)          | 2018-08-28 | 2196        | 58358.7 | 0.160     | 0.524  | 0.071       | -0.002      |
| NICER (N5)          | 2018-08-29 | 3803        | 58359.0 | 0.185     | 0.526  | 0.071       | -0.002      |
| Swift/XRT (XRT2)    | 2018-08-29 | 1189        | 58359.4 | 0.216     | 0.529  | 0.071       | -0.002      |

высокоэффективной системой пропускающих дифракционных решеток для высокоэнергетичного излучения HETGS. Кроме того, в период активности были проведены наблюдения телескопом NICER (Neutron star Interior Composition Explorer). Три наблюдения NICER (N1, N4 и N5) были проведены в режиме ТоО непосредственно во время вспышек. Помимо этого, две длительные экспозиции (N2 и N3) были накоплены в одновременных наблюдениях с обсерваторией Chandra в рамках программы калибровочных наблюдений [22].

Анализ широкого массива рентгеновских данных, полученных в период повышенной активности системы летом 2018 г., включавшей радиовспышки рекордной амплитуды, показал наличие релятивистски-смещенных линий во всех доступных наблюдениях. Таким образом, запуск барионных релятивистских струй в эти периоды не прекращался. Одним из наиболее стабильных параметров релятивистских струй SS 433 является скорость их направленного движения  $v = 0.26c$ , измеряемая по доплеровскому смещению линий.

На Рис. 11 представлено измерение доплеровских смещений линий джетов по всем рентгеновским наблюдениям в период активности SS 433 в 2018 г. (Табл. 7). В течение почти всех наблюдений, изученных в этой работе, вклад западного джета оказался доминирующим в наблюдаемом спектре. Ввиду прецессионных фаз наблюдений, близких к кроссоверу, спектральное разрешение и качество данных NICER и Swift/XRT не достаточны для надежного определения положения восточного джета.

В двух последовательных наблюдениях Chandra виден резкий скачок в положении линий западного джета, который полностью подтверждается в одновременных наблюдениях N2 и N3. В последующих наблюдениях (N4, N5 и

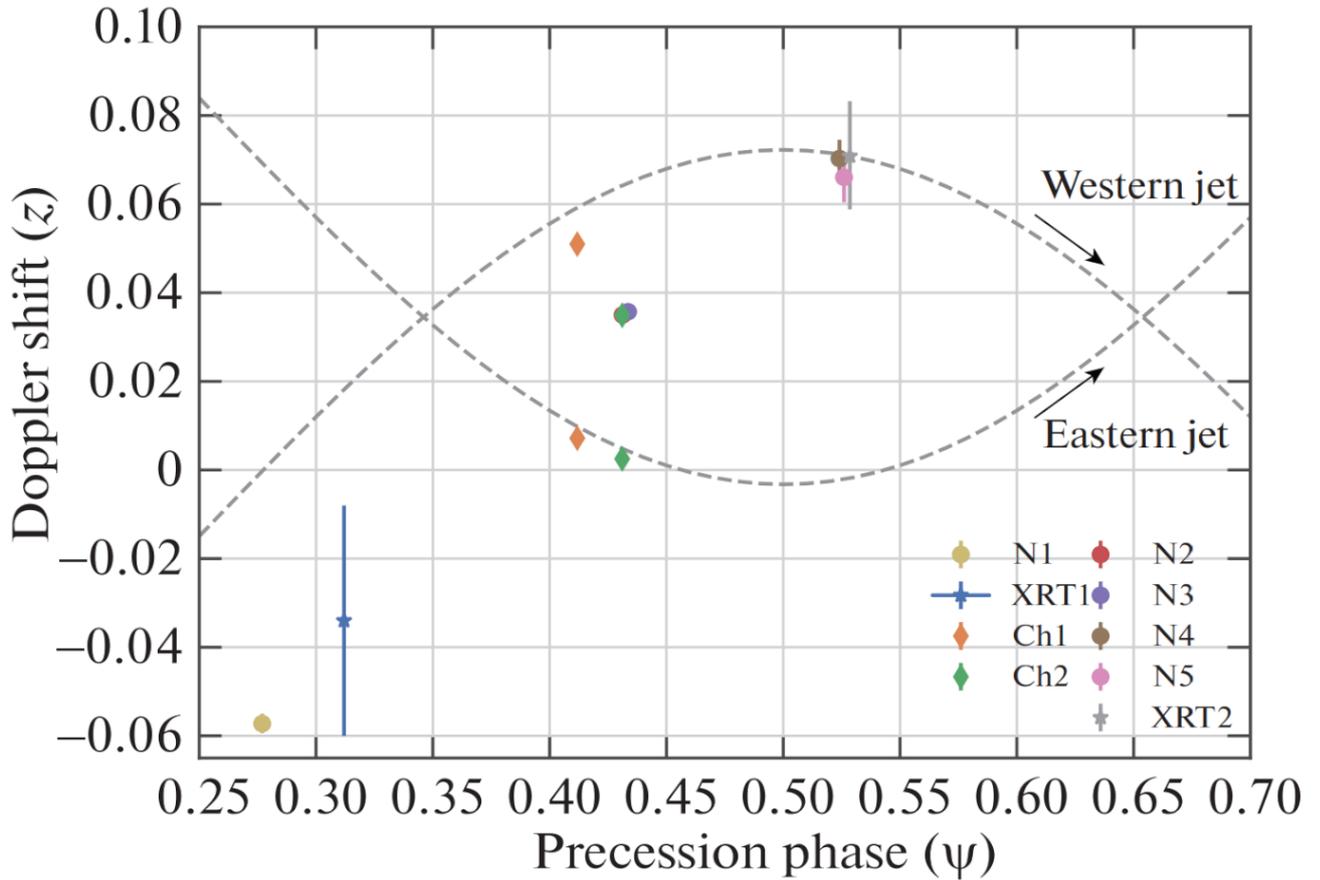


Рисунок 11 — Доплеровские смещения линий джетов ( $z$ ) в зависимости от прецессионной фазы SS 433 ( $\psi$ ), найденные по данным из Табл. 7. Предсказание положения линий согласно кинематической модели и эфемеридам [68] изображено в виде двух пунктирных линий [22]

XRT2) положение линий западного джета оказывается совместимым с предсказанием кинематической модели. Ошибки измерения (в некоторых случаях меньше размера маркера на Рис. 11), а также неопределенность в идентификации линий минимизированы, благодаря использованию наборов линий разных элементов и степеней ионизации и их самосогласованного описания при помощи модели излучения многотемпературных джетов. Традиционно отклонения от кинематической модели объясняются либо изменением ориентации по отношению к лучу зрения, либо изменением направленной скорости струй. Для разделения этих двух возможностей требуется измерение положения линий от обоих джетов и некоторые предположения об их взаимной ориентации. В качестве последнего наиболее естественным выглядит предположением об антинправленности струй, отражающее симметричность в области запуска и коллимации струй. Предполагая идеальную симметрию и одинаковую скорость струй, наблюдаемое относительное положение линий струй в наблюдениях Ch2, N2 и N3 означало бы следующую оценку их скорости:  $\beta = 0.193 \pm 0.001$ , что существенно ниже среднего наблюдаемого  $\beta = 0.26$  (см. [99]). Общая картина

в период орбитального затмения звездой-донором согласуется с представлением о полном блокировании излучения горячей части одного из джетов, при этом область с температурой ниже  $\sim 1.5$  кэВ остается видимой наблюдателю. Тем не менее мы наблюдаем заметные нерегулярные изменения в параметрах модели излучения на масштабе всего нескольких дней. В частности, наблюдалось существенное увеличение потока в линиях западного джета в наблюдении Ch2, несмотря на орбитальное затмение [22]. Измеряемые физические параметры струй оказываются близки к значениям, полученным ранее на основе систематического спектроскопического анализа данных рентгеновских наблюдений обсерваториями Chandra и XMM-Newton [99]. В частности, спектры, наблюдаемые во время радиовспышек, близки к спектрам, полученным ранее обсерваторией Chandra в так называемом “низком” состоянии системы. Такие состояния не имеют отношения к орбитальной или прецессионной переменности в системе, что демонстрируется при помощи долговременной кривой блеска SS 433, полученной орбитальной обсерваторией MAXI [104] и дополненной представленными нами измерениями Swift, Chandra и NICER (см. 12).

Интенсивность рентгеновского излучения в эти периоды упала в 4–5 раз по сравнению с обычными состояниями, при этом его спектральная форма продолжала описываться моделью излучения остывающих барионных джетов. Учитывая общую стабильность физических параметров рентгеновских джетов, наблюдаемое падение рентгеновского потока согласуется со сценарием увеличения темпа оттока вещества в виде ветра, частично блокирующего излучение от горячих областей джетов. В частности, такой механизм возникновения радиовспышек был предложен в работе [86]. Важно отметить, что полетное время до области радиоизлучения джетов составляет несколько дней, а радионаблюдения РАТАН-600 не разрешают область центрального рентгеновского источника. Ввиду этого причинная связь между наблюдаемым падением интенсивности излучения рентгеновских струй или увеличением плотности ветра в этой области со вспышками радиоизлучения остается невыясненной. Открытым в физике релятивистских струй, запускаемых компактными объектами в микрокварах и активных ядрах галактик, остается вопрос о так называемой барионной загрузке, т.е. доле барионов в общем числе частиц вещества джетов. В случае галактических микроквazarов, например, Cyg X-1, Cir X-1 или GRS 1915+105, струи напрямую проявляют себя только по радио и инфракрасному излучению релятивистских электронов (см. [105]), в то время как оценки для барионной

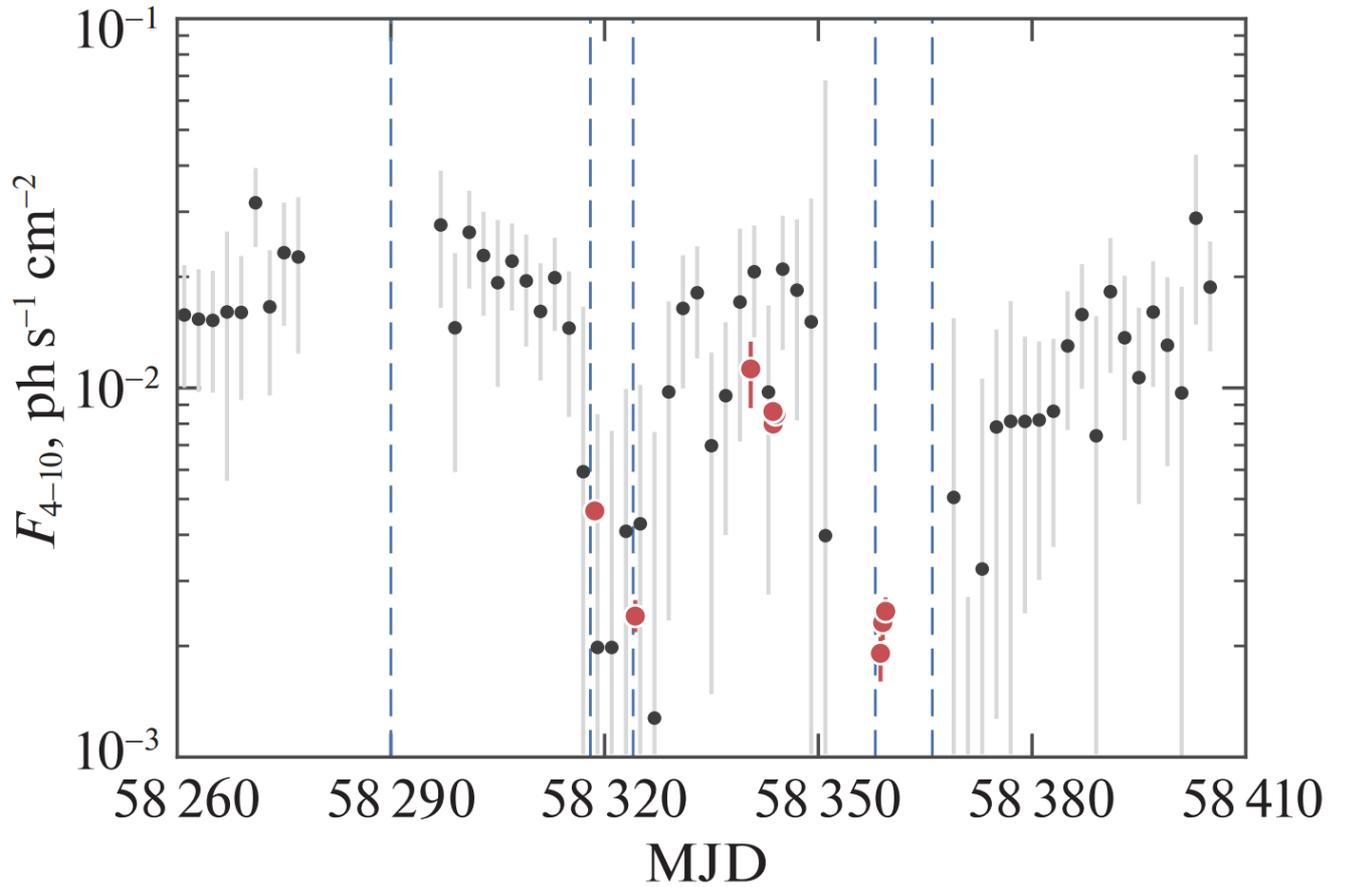


Рисунок 12 — Рентгеновская кривая блеска SS 433 в диапазоне энергий 4–10 кэВ в период активности в 2018 г. Черными точками с серыми усами ошибок показаны измерения рентгеновского монитора неба MAXI с временным разрешением 2 дня, красными кружками (ошибка меньше размера кружка) показаны потоки, полученные по моделям наилучшей аппроксимации для наблюдений из Табл. 7. Синие вертикальные пунктирные линии указывают на моменты пиков радиовспышек [22]

загрузки получают из анализа влияния этих объектов на окружающую среду, в частности, оценок полной требуемой энергии (см. [106]). В случае SS 433 ситуация в некотором смысле обратная, так как именно доминирующая по энергии барионная компонента с близким к солнечному обилию тяжелых элементов обуславливает наиболее важные наблюдательные свойства, при этом механизм формирования радиоизлучения до конца не ясен [107].

Наблюдения радиоджетов SS 433 с высоким угловым разрешением подтверждают, что индивидуальные узлы перемещаются со скоростью, близкой к 0.26с, т.е. радиоизлучающие области совпадают (по крайней мере кинематически) с областями рентгеновского и оптического излучения в линиях [108]. При этом есть указание на возможное существование также и более быстрого, с направленной скоростью более 0.5 с, оттока энергии, который мог бы объяснить кратковременное уярчение радио- и рентгеновского излучения на масштабах

порядка угловой секунды (т.е. на расстоянии около десятой доли парсека от центрального источника [109]). Однако существуют сценарии, объясняющие переменность протяженного излучения без необходимости дополнительного высокоскоростного оттока [110]. Представленные нами рентгеновские данные в период повышенной активности SS 433 показывают, что спектр излучения продолжает неплохо описываться моделью излучения остывающих барионных джетов с обилием тяжелых элементов, близким к солнечному. Таким образом, возможный вклад синхротронного излучения релятивистских электронов в рентгеновском диапазоне должен оставаться невелик. Очевидно, что из-за текущего качества данных в "низких" состояниях системы, невозможно получить более строгий количественный вывод, и требуются длительные рентгеновские наблюдения непосредственно в периоды радиовспышек для прояснения данного вопроса (см. [111]). Другой интересной возможностью может быть измерение поляризации рентгеновского излучения системы в эти периоды, в частности при помощи обсерватории [112; 113].

### 2.1.3 Выводы

Вспышки, наблюдавшиеся в 2018 году, были исключительными по своей интенсивности. Радиовспышка 25 августа 2018 года была ярчайшей за всю историю наблюдений SS 433. Несмотря на экстремальный характер вспышек, основные параметры кинематической модели SS 433 остались стабильными. Это согласуется с результатами долговременного мониторинга, представленными в работе [64], где отмечается отсутствие значимых вековых изменений параметров на протяжении более 40 лет наблюдений. Обнаруженные аномальные отклонения положений линий струй от предсказаний кинематической модели может указывать на уникальные условия, возникающие во время экстремальных вспышек.

Благодаря наблюдениям беспрецедентно мощных радиовспышек, сопровождаемых одновременными наблюдениями в рентгеновском и оптическом диапазонах, был проведён детальный анализ поведения системы в экстремальных условиях, что существенно расширяет наше понимание физических процессов в этой уникальной системе.

Ключевым результатом является обнаружение значительных изменений в интенсивности рентгеновского излучения струй во время вспышек, при сохранении стабильности основных параметров кинематической модели. Это указывает на то, что механизмы формирования и коллимации струй остаются устойчивыми даже в периоды экстремальной активности. Однако наблюдаемые аномалии в положении линий струй свидетельствуют о возможных изменениях в геометрии или динамике струй во время вспышек.

Обнаружена связь между усилением ветра от сверхкритического аккреционного диска и возникновением радиовспышек. Это и подтверждает, и расширяет результаты предыдущих исследований [86], детализируя взаимодействие различных компонентов системы.

Многоволновая природа наблюдаемых вспышек подчеркивает глобальный характер изменений в системе, затрагивающих как внутренние, так и внешние области аккреционного течения. Это согласуется с результатами предыдущих исследований, но предоставляет более полную картину благодаря одновременным наблюдениям в различных диапазонах длин волн.

## 2.2 GRS 1915+105

### 2.2.1 Введение

В августе 1992 года с помощью рентгеновского обзора неба WATCH космической обсерваторией "GRANAT" была открыта рентгеновская двойная система GRS 1915+105 в созвездии Орла. С помощью телескопа SIGMA были определены координаты этого источника. Опираясь на предыдущие исследования, испанский астрофизик А. Кастро-Тирадо совместно Ф. Мирабелем решили провести картографирование области вокруг GRS 1915+105 на радиоинтерферометре VLA, и обнаружили переменный относительно яркий радиоисточник, в результате этих исследований объект отождествлён со звездой в ИК-диапазоне. Весной 1994 г. Мирабель и Родригез осуществили картографирование системы GRS 1915+105 на VLA в период яркой вспышки с целью исследовать радиокарты. Результатом исследования стало обнаружение сверхсветового расширения радиокомпонентов, разлетающихся от центра системы. Это сверхсветовое движение радиокомпонент позже было объяснено в рамках релятивистской теории,

когда источник излучения движется со скоростью, близкой к скорости света под малым углом к лучу зрения наблюдателя. Струйные выбросы системы GRS 1915+105 разлетались от центра системы со скоростью  $\sim 0.92$  скорости света, а угол вектора скорости к лучу зрения был равен  $\sim 70^\circ$ . Кинетическая мощность СВ составляла  $\sim 10^{40}$  эрг/с. После обнаружения сверхсветового движения радиокомпонент на картах VLA, источник GRS 1915+105 получил название "галактический квазар" [1]. Такой же эффект неоднократно фиксировался в наблюдательных проявлениях квазаров и радиогалактик. Был сделан вывод, что и в галактических РДС, видимых в радиодиапазоне, также возможны движение радиокомпонент с околосветовыми скоростями. В конце 1997 года по наблюдениям на радиоинтерферометре MERILIN также обнаружено видимое сверхсветовое расширение радиокомпонент, а их скорость разлёта оказалась  $\sim 0.98$  скорости света, а угол луча зрения составлял  $\sim 66^\circ$ . В последующих исследованиях в рентгеновском, инфракрасном и радиодиапазонах в системе наблюдались квазипериодические осцилляции потока в течение времени существования аккрецирующего вещества в диске на последней стабильной орбите. Был сделан вывод, что источник GRS 1915+105, вероятно, содержит релятивистский компонент – черную дыру с массой  $\sim 10M_\odot$  и звезду F-класса массой порядка солнечной. В течение последующих лет, по результатам анализа взаимовлияния темпов аккреции и рентгеновского состояния аккреционного диска на формирование и эволюцию СВ, была сформулирована струйная парадигма, в которой предложен сценарий, объединяющий аккрецию вещества на релятивистский объект и формирование струй в единый процесс [114]. Очевидно, что исследования подобных систем необходимо проводить одновременно в широком диапазоне электромагнитных волн (от радиоволн до гамма-излучения). В рамках программы мониторинга радиопотока GRS 1915+105 на телескопе РАТАН-600 детектированы целые серии ярких радиовспышек – разлетающихся облаков синхротронно-излучающих релятивистских частиц, коррелирующих с повышением рентгеновского потока. Короткие компактные струйные выбросы в периоды активного состояния системы, существуют почти постоянно, и характеризуются, как оптически толстый источник по спектру полного потока в радиодиапазоне. Когда в джете развиваются внутренние ударные волны, то вырастают скорость движения СВ, интенсивность радиоизлучения, и линейная поляризация в несколько раз в течение нескольких часов, а радиоспектр излучения становится оптически тонким [115]. Вероятно, причина генерации

внутренних ударных волн связана с нестационарным потоком вещества, падающего в джеты из аккреционного диска. Процессы вблизи ЧД крайне неустойчивы: часть вещества "проваливается" под горизонт событий и навсегда исчезает для внешнего наблюдателя, а часть вещества устремляется в струи, и там создаются условия ударного взаимодействия.

В инфракрасном диапазоне GRS 1915+105 также демонстрирует интересное поведение. Мирабель и др. перечислили несколько возможных источников инфракрасного излучения в этой системе [116]:

1. Излучение от звезды-компаньона
2. Переработка рентгеновского излучения во внешних частях аккреционного диска
3. Оптически тонкое свободно-свободное излучение от рентгеновски-управляемого ветра [117]
4. Синхротронное излучение от струй [118]
5. Доплеровски сдвинутое линейчатое излучение от ионов в релятивистских струях
6. Тепловое излучение пыли, переизлучающей энергичные вспышки [119]

В рентгеновском диапазоне GRS 1915+105 демонстрирует драматические временные и спектральные вариации, происходящие регулярно [120]. Одновременные наблюдения в радио-, инфракрасном и рентгеновском диапазонах указывают на тесную связь между нестабильностями аккреционного диска и выбросом плазмонов, излучающих синхротронное излучение [121], [26], [122], [123]. GRS 1915+105 известен своими яркими дискретными выбросами. Они происходят быстро, поэтому их начало ускользало от прямого наблюдения. Было показано, что рентгеновский поток увеличивается в часы, предшествующие крупному выбросу [124]. Увеличение рентгеновского потока были связаны с крупными радиовыбросами на основе ежедневного мониторинга [125]. Однако грубое временное разрешение затрудняет определение того, происходили ли увеличения рентгеновского потока до, во время или после эпизода выброса. Ситуация еще больше осложняется попытками унифицировать явления в струях. Существует мониторинг с высоким временным разрешением (минуты и секунды) осциллирующих событий, которые обсуждаются в едином контексте с крупными радиовыбросами [126]. Представление о падении рентгеновского потока, предшествующего сверхсветовым выбросам, стало широко принятым понятием.

В рентгеновском диапазоне GRS 1915+105 демонстрирует уникальное поведение как в жестком, так и в мягком рентгеновском излучении [127], [128]. Беллони и др. классифицировали различные состояния источника на основе его спектральных и временных характеристик. Одним из таких является состояние *плато*, которое характеризуется низким уровнем потока в рентгеновском и радиодиапазонах [120]. Происхождение мягкого рентгеновского излучения в этом состоянии не совсем ясно - оно может быть либо излучением от аккреционного диска с высокой температурой ( $> 1$  кэВ), либо комптонизированным спектром [129], [130]. Состояние *плато* наблюдалось примерно раз в несколько лет и обычно продолжалось несколько недель [131]. Поскольку источник проводит большую часть времени в низком/жестком режиме (состояние С по классификации Беллони [120]), переход в состояние *плато* происходит нечасто. Хотя это состояние является одним из фундаментальных и важных фаз для понимания природы GRS 1915+105, многоволновые исследования в этом состоянии проводились редко. В радиодиапазоне GRS 1915+105 известен своими spectacularными дискретными выбросами.

По классификации Икенберри [132], наблюдаются по крайней мере три класса струй:

1. Класс А - крупные события выброса с радиопотоками около 1 Ян [133], [134].
2. Класс В - повторяющиеся вспышки с периодом 30-60 минут и амплитудами 100-200 мЯн, связанные с изменением состояния рентгеновского потока [26], [122].
3. Класс С - слабые инфракрасные вспышки с амплитудами 10 мЯн, наблюдаемые одновременно со вспышками в мягком рентгеновском диапазоне [132], [135]

Вспышки класса В, наблюдаемые в рентгеновском состоянии  $\beta$  [120], запускаются быстрым всплеском в мягком рентгене, разделяющим фазы жесткого и мягкого провалов [26], [136]. Близкие времена спада в радио- и инфракрасном диапазонах указывают на то, что адиабатическое охлаждение доминирует над радиационным охлаждением [137], [138]. Поэтому оценка внутренней мощности струй оказывается намного больше, чем наблюдаемая в виде излучения [8].

Интересно, что пик инфракрасного излучения в событиях класса С, по видимому, предшествует резкому спаду рентгеновского потока на 200-600 с, что объясняется связью диск-джет по принципу "снаружи внутрь" [132]. Зави-

сящая от частоты задержка пиков вспышек (пики на более высоких частотах наступают раньше) может быть объяснена в терминах расширяющихся плазмодов, излучающих синхротронное излучение [26]. Однако, как было замечено в работе [138], плоские спектры их пиковых потоков в радио- и К-диапазонах трудно объяснить простой моделью ван дер Лаана [9], [26], скорее они поддерживают модели частично самопоглощенных конических струй, применяемые для АЯГ [139]. Более современные модели для квазистационарных струй предложены в [140] и [40]

В рентгеновском и гамма-диапазонах GRS 1915+105 демонстрирует спектр степенного закона с фотонным индексом около  $\sim 3$ , простирающийся до энергий выше 1 МэВ без заметного обрыва [141]. Такие мягкие спектры часто наблюдаются у кандидатов в ЧД в мягком состоянии [142], когда большая часть энергии излучается ниже 5 кэВ через тепловое излучение от оптически толстого аккреционного диска [143]. Эти спектры мягкого состояния явно отличаются от типичных энергетических спектров в жестком состоянии, которые показывают спектры степенного закона с фотонным индексом  $\sim 1.7$  и тепловым обрывом около 100-200 кэВ [144], [142]. Спектральные изменения в фазе осцилляций, которые, как считается, вызваны термо-вязкой нестабильностью [11,12,13], были отмечены многими авторами. Фактически, как указывал в своих работах Ямаока [145], видимая высокая температура и малый радиус в высоком состоянии осцилляций могут быть объяснены излучением от оптически толстого адвекционно-доминированного аккреционного потока (так называемый тонкий диск [146]), как следствие такого перехода. Такой переход может запускать выброс струй, наблюдаемых в радио- и инфракрасном диапазонах [123]. Было обнаружено, что спектр в фазе провала между быстрыми осцилляциями и в более стабильном состоянии *плато* выглядит похожим, подтверждая, что они по существу относятся к одному и тому же классу спектрального состояния [120]. Действительно, они также имеют схожие временные характеристики, показывая КПО [147]. Корреляция между частотой КПО и радиусом диска в состоянии *плато* согласуется с утверждениями предыдущих авторов в том смысле, что КПО с более высокой частотой наблюдается на меньшем радиусе диска. Такая корреляция может быть объяснена нестабильностью аккреционного потока и СВ [148], [149], [150].

Многоволновые наблюдения GRS 1915+105 предоставили важную информацию о связи между аккреционным диском и релятивистскими струями в

этой системе. Особый интерес представляют корреляции между рентгеновским, инфракрасным и радиоизлучением. В работах Пули и Фендера [121], Икенберри и др. [122] и Мирабель и др. [26] обнаружена тесная связь между спадом рентгеновского потока и радио/инфракрасными вспышками. Эти наблюдения интерпретируются как свидетельство того, что выбросы плазмоидов, излучающих синхротронное излучение, связаны с нестабильностями внутренней части аккреционного диска. Однако точный механизм, запускающий эти выбросы, остается дискуссионным. Некоторые авторы связывают их с мягкими рентгеновскими состояниями [151], в то время как другие - с жесткими [123]. Задержки между различными радиодиапазонами [121] и между инфракрасным и радиодиапазонами [26], [138] ясно указывают на то, что эффекты оптической толщины играют важную роль в наблюдаемом излучении от этих выбросов. Детали, такие как величина и переменность этих задержек, имеют решающее значение для получения количественного понимания процесса истечения. Уэда и др. [152] провели одну из крупнейших скоординированных многоволновых кампаний по наблюдению GRS 1915+105, охватывающую широкий диапазон энергий от радио (1-100 ГГц) до инфракрасного (полосы J, H и K) и рентгеновского/гамма-излучения (от 1 кэВ до 10 МэВ).

Измерения нескольких многоволновых кампаний GRS 1915+105 показали, что источник находился преимущественно в состоянии *плато* (или низком/жестком), но иногда показывал мягкие рентгеновские осцилляции. Наблюдались и быстрые, квазипериодические ( $\sim 45$  минут) циклы вспышек и спадов. В распределении спектральной энергии в состоянии *плато* оптически толстое синхротронное излучение доминирует в радиодиапазоне, а комптонизация — в рентгеновском и гамма-диапазонах. Малая светимость в радиодиапазоне относительно рентгеновского указывает на то, что GRS 1915+105 попадает в режим радиотихих микроквазаров, когда радиопоток вообще не детектируется.

В работе [153] Фендер и др. использовали многочастотные наблюдения для изучения спектра синхротронного излучения от струй. Они обнаружили, что спектр часто является плоским или инвертированным ( $\alpha \geq 0$ ) от радио до миллиметрового диапазона. Это интерпретируется как результат частично оптически толстого синхротронного излучения от конической струи с градиентом оптической толщи вдоль струи [139]. Интересные результаты были получены при изучении поляризации радиоизлучения от струй. В работе Фендера и др.

[154] обнаружено, что линейная поляризация в состоянии *плато* обычно низкая ( $\lesssim 1\%$ ), что согласуется с преимущественно тангенциальным магнитным полем в струе. Однако во время сильных выбросов наблюдалась более высокая степень поляризации (до  $\sim 10\%$ ), что указывает на более упорядоченное магнитное поле. Одним из ключевых вопросов в понимании физики GRS 1915+105 является механизм, ответственный за запуск и коллимацию струй. Несколько моделей были предложены для объяснения наблюдаемых свойств струй, включая магнитогидродинамические модели [37], [155] и модели, основанные на давлении радиации [156]. Другим важным аспектом является связь между аккреционным диском и струями. Наблюдения показывают сложную взаимосвязь между рентгеновским излучением от диска и радиоизлучением от струй. Например, в работе Фендера и др. [14] предложили унифицированную модель для описания поведения рентгеновских двойных систем, включая GRS 1915+105, в которой переходы между различными состояниями аккреционного диска связаны с изменениями в структуре и мощности струй.

Таким образом, многоволновые наблюдения GRS 1915+105 предоставили богатую информацию о физических процессах в этой системе. Они показали, что GRS 1915+105 является сложной системой с тесной связью между аккреционным диском и релятивистскими струями. Однако многие вопросы остаются открытыми, включая точный механизм запуска струй, природу быстрой переменности в различных диапазонах длин волн и роль магнитных полей в коллимации и ускорении струй.

### 2.2.2 Спорадические яркие вспышки с 2019 по 2021 год

В рамках долговременного мониторинга микроквара GRS 1915+105 на частотах 2.3-22.3 ГГц на РАТАН-600 [157; 158], в период с 1 апреля по 11 мая 2019 года источник был обнаружен на уровне менее 10 мЯн на частоте 4.8 ГГц. После 8 мая микрокварз вошел в состояние с очень низким рентгеновским потоком по данным Swift/BAT [159]. Подобное состояние ранее наблюдалось в 2007 году [157]. 16 мая 2019 года (MJD 58619) в системе GRS 1915+105 наблюдался поток около 100 мЯн на частоте 11.2 ГГц сразу после рентгеновских

событий, зарегистрированных Swift/BAT<sup>3</sup> (15-50 кэВ) и MAXI<sup>4</sup> (2-20 кэВ) (Рис. 13). Полученные данные согласуются с данными AMI-LA [160]. Эволюция оптически толстого режима радиоизлучения в оптически тонкий режим показана на Рис. 13, и хорошо аппроксимируется степенным законом с различными спектральными индексами [161].

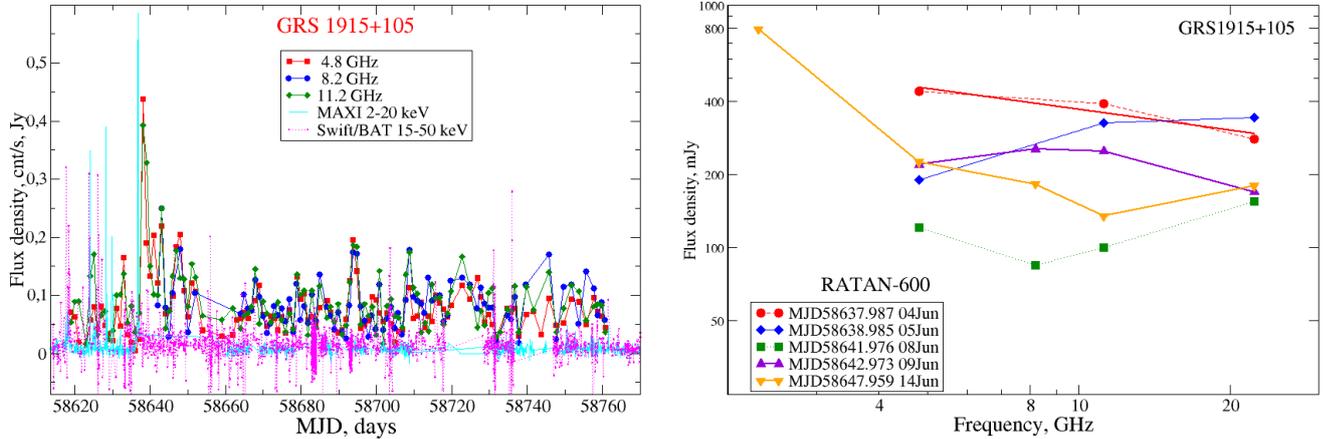


Рисунок 13 — Кривые блеска (слева) и радиоспектры (справа) в июне 2019 года.

Наиболее яркое событие (очевидно связанное с выбросом джета) было зарегистрировано 4 июня (MJD 58637.99) примерно через сутки после вспышки, обнаруженной MAXI (MJD 58636.78) (Рис. 13).

Спектр в максимуме вспышки хорошо аппроксимируется формулой:

$$S_{\nu}[\text{мЯн}] = 720\nu[\text{ГГц}]^{-0.3} \quad (7)$$

Такой уровень радиопотока наблюдался впервые за несколько лет и очевидно связан со вспышечной рентгеновской активностью. Необходимо отметить, что радиовспышки в данной системе происходят довольно редко.

Осенью 2019 года в системе GRS 1915+105 была вновь обнаружена активность. В первые сутки вспышки потоки выросли в несколько раз относительно спокойного состояния (Рис. 14). 21 ноября 2019 года (MJD 58808.52) в ходе нашего мониторинга микроквазаров была зарегистрирована новая яркая вспышка от GRS 1915+105: 290, 440, 390 и 375 мЯн на частотах 2.3, 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц соответственно [162]. Событие в конце ноября 2019 года отождествлено с яркой рентгеновской вспышкой, обнаруженной на рентгеновской обсерватории NICER[163]. По данным MAXI и Swift/BAT заметной рентгеновской активности обнаружено не было.

<sup>3</sup><https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/GRS1915p105/>

<sup>4</sup>[http://maxi.riken.jp/star\\_data/J1915+109/J1915+109.html](http://maxi.riken.jp/star_data/J1915+109/J1915+109.html)

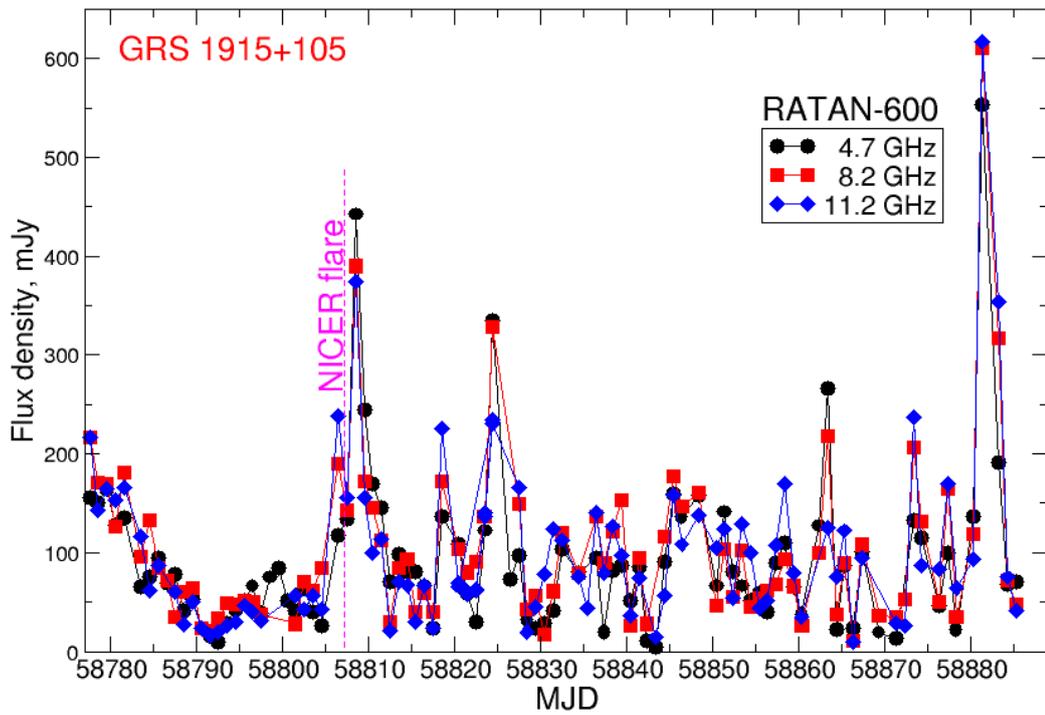


Рисунок 14 — Кривые блеска GRS 1915+105 осенью 2019 года

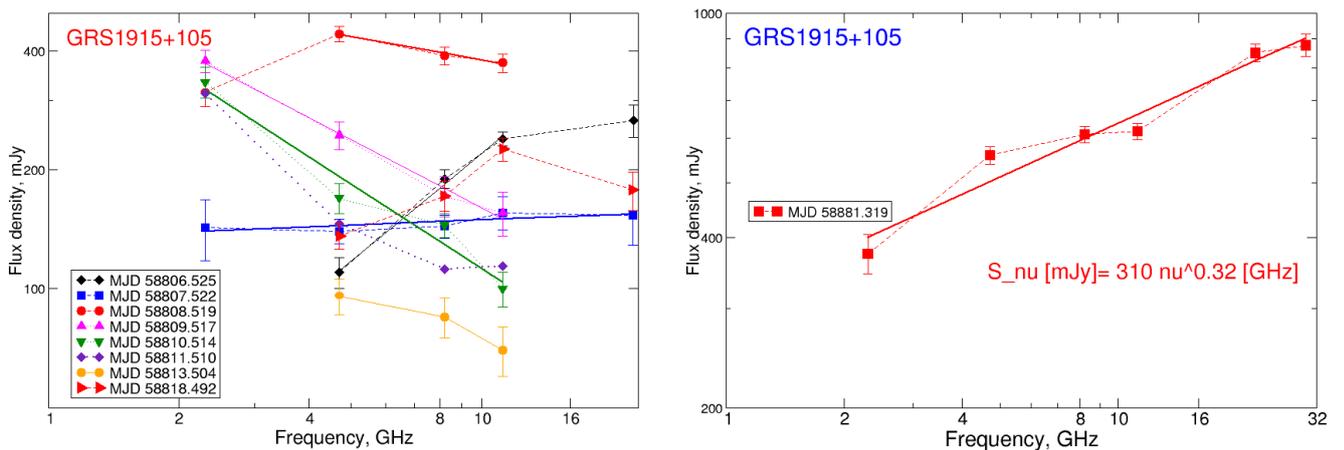


Рисунок 15 — Радиоспектры для вспышек, зарегистрированных в ноябре (слева) 2019 г. и феврале (справа) 2020г.

Радиоспектры в течение первых дней с 19 по 21 ноября сильно различаются: от инвертированного со спектральным индексом  $\alpha = +0.9$  на низких частотах, до почти плоского спектра ( $\alpha = +0.04$ ) и оптически тонкого ( $\alpha = -0.2$ ) на более высоких частотах (Рис. 15) [162]. Похоже, такое поведение связано с формированием релятивистских СВ [1].

В результате последующего мониторинга системы GRS 1915+105 на РАТАН-600 была обнаружена новая яркая вспышка в начале февраля 2020 года (MJD 58881.319). Измерения плотности потока излучения равны: 375, 560, 610, 620, 870 и 880 мЯн на частотах 2.3, 4.7, 8.2, 11.2, 22.2 и 30 ГГц соответственно.

Радиоспектр в максимуме соответствовал степенному закону со спектральным индексом  $\alpha = +0.31$  (Рис. 15). То есть вспышка была оптически толстая. Кривые блеска GRS 1915+105 в период с 21 октября 2019 года по 11 февраля 2020 года показаны на Рис. 14 [164].

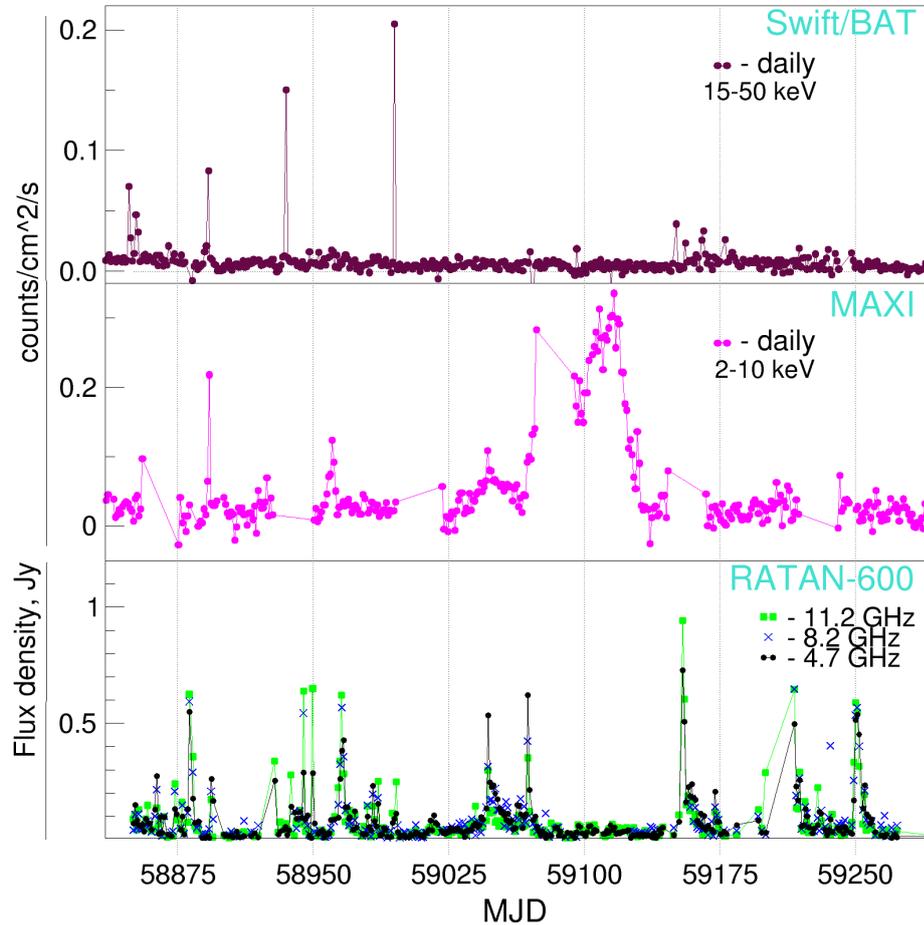


Рисунок 16 — Кривые блеска с 2019 по 2021 гг. по данным мониторинга MAXI, Swift/BAT и РАТАН-600

С июля по август вновь были обнаружены две оптически тонких вспышки с потоками: 535 мЯн (MJD 59046.9) и 640 мЯн (MJD 59068.9) на частоте 4.7 ГГц. Эти вспышки могут быть связаны с заметными изменениями потока мягкого рентгеновского излучения (MAXI, 2-10 кэВ), после чего система более чем два месяца не проявляла вспышечной активности в радиодиапазоне, а излучение в мягком рентгене выросло в несколько раз.

1 ноября 2020 года (MJD 59155.1) наблюдалась яркая оптически толстая радиовспышка со значениями потока: 730 и 940 мЯн на частотах 4.7 и 11.2 ГГц соответственно. Этому событию предшествовало резкое падение мягкого рентгеновского излучения спустя  $\sim 70$  дней яркого излучения в аккреционном

диске, а само яркое событие в радиодиапазоне сопровождалось небольшой активностью в жестком рентгене (Рис. 16).

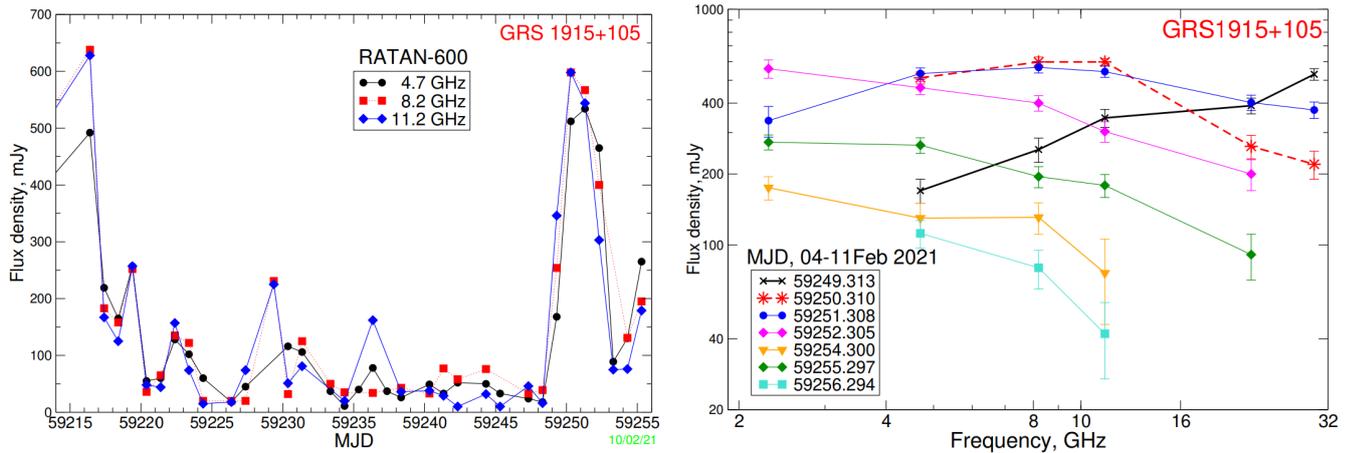


Рисунок 17 — Кривые блеска (слева) и эволюция радиоспектра (справа) в феврале 2021 г.

Последнее событие этой серии вспышек случилось в феврале 2021 г. На Рис. 17 слева показана кривая блеска двух последних событий, обнаруженных в радиодиапазоне. На Рис. 17 справа показаны суточные спектры февральского события, где хорошо прослеживается постепенный переход оптически толстого синхротронного излучения в оптически тонкое в течение первых трёх дней после начала вспышки. Таким образом, можно предположить эволюцию струйного выброса от компактного к расширенному как минимум в одном измерении в течении вспышки. После события в феврале 2021 года, в течение нескольких месяцев наблюдались очень низкие значения плотности потока излучения в радиодиапазоне. Вскоре источник и вовсе перестал обнаруживаться на РАТАН-600.

### 2.2.3 Гигантские вспышки в 2023 году

В начале марта 2023 года был обнаружен слабый радиопоток на пределе чувствительности радиотелескопа на частоте 4.7 ГГц, а 25 марта 2023 года (MJD 60028.5803) согласно данным мониторинга Swift/BAT [165], поток в жестком рентгеновском диапазоне (15-50 кэВ) увеличился от нулевого до 1.6 отсчетов/см<sup>2</sup>/сек в течение 9 часов. Время затухания вспышки можно было оценить менее чем за 3 часа. Такое событие обнаружено впервые за последние несколько десятков лет. Результаты ежедневного мониторинга микроквазара GRS 1915+105 на радиотелескопе РАТАН-600 показали сопутствующие радиовспышки:  $\sim 135$  мЯн на частоте 4.7 ГГц и  $\sim 65$  мЯн на частоте 11.2 ГГц

соответственно (MJD 60030.175), тогда как потоки за неделю до этого события все время были ниже 20 мЯн [166]. Эта вспышка была первой с 5 февраля 2021 г. Кривые блеска радио- и жесткого рентгеновского излучения приведены на Рис. 18.

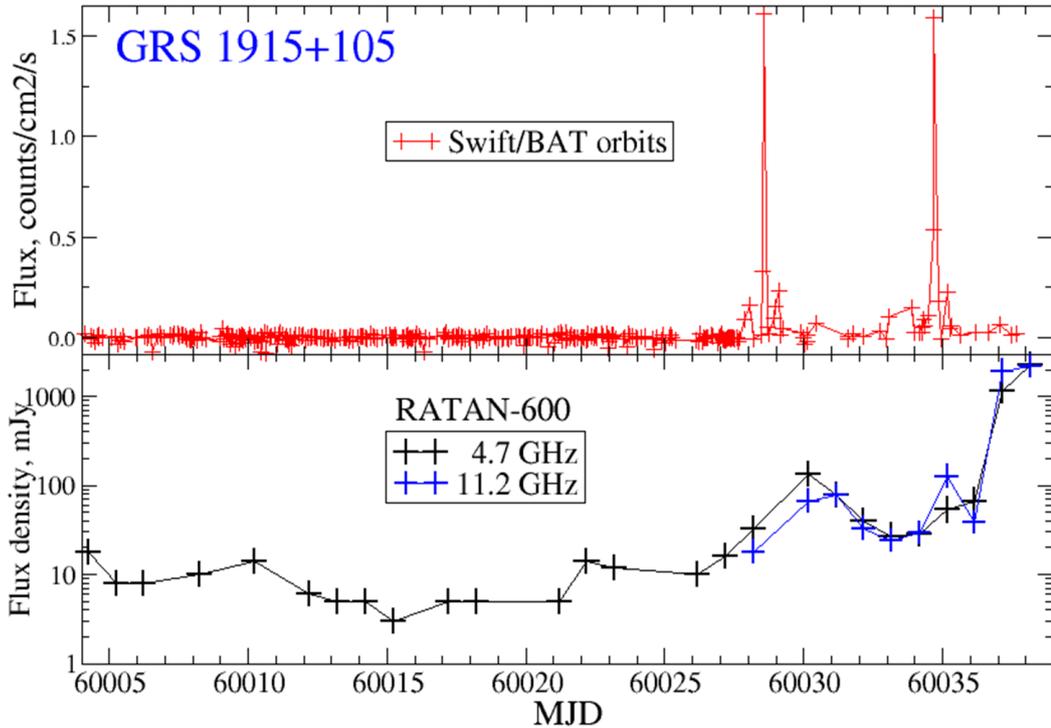


Рисунок 18 — Кривые блеска GRS 1915+105 весной 2023 года

Спустя несколько дней (MJD 60034.6761) в системе GRS 1915+105 была обнаружена вторая за две недели яркая вспышка в жестком рентгене по данным Swift/BAТ (15-50 кэВ), а также в мягком рентгеновском диапазоне по данным MAXI/GSC, о начале которой сообщил Ямада и др. [167].

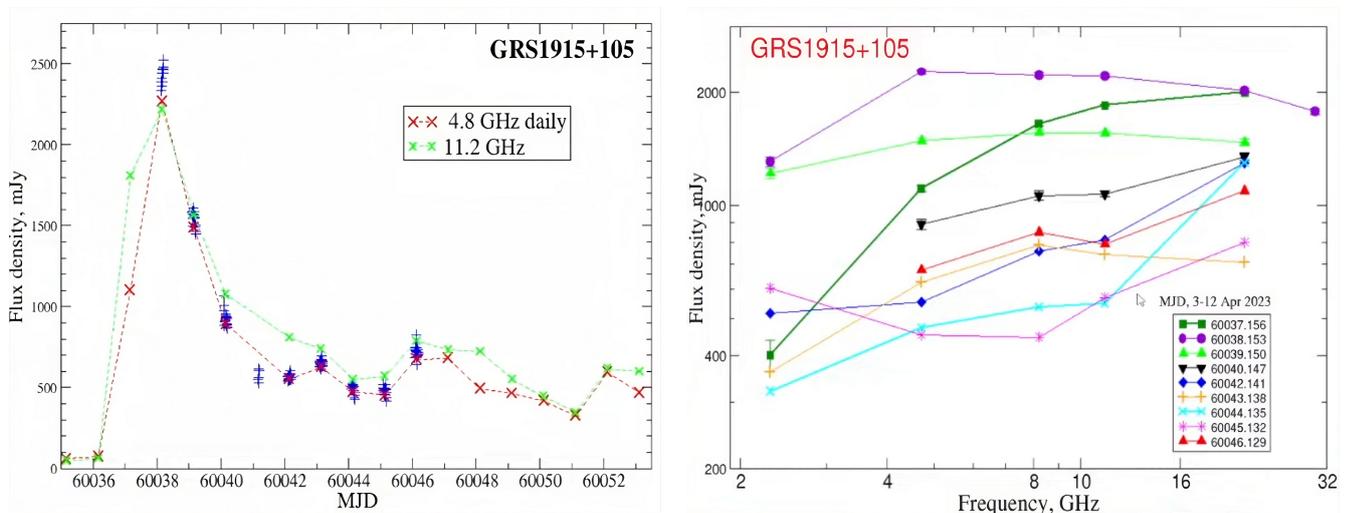


Рисунок 19 — Кривые блеска и радиоспектры гигантской вспышки в апреле 2023 г.

Летом 2023 года в ходе ежедневного мониторинга на РАТАН-600 было обнаружена исторически ярчайшая вспышка от микроквара GRS 1915+105 (Рис. 20). Как и во время события в марте-апреле [167; 168], 31 июля 2023 года (MJD 60156.829) были проведены суточные измерения:  $1020 \pm 30$ ,  $1170 \pm 30$ ,  $1150 \pm 30$ ,  $1140 \pm 30$ ,  $1020 \pm 40$  и  $870 \pm 40$  мЯн на частотах 4.7, 8.2, 11.2, 14.4, 22.3 и 30.0 ГГц соответственно.

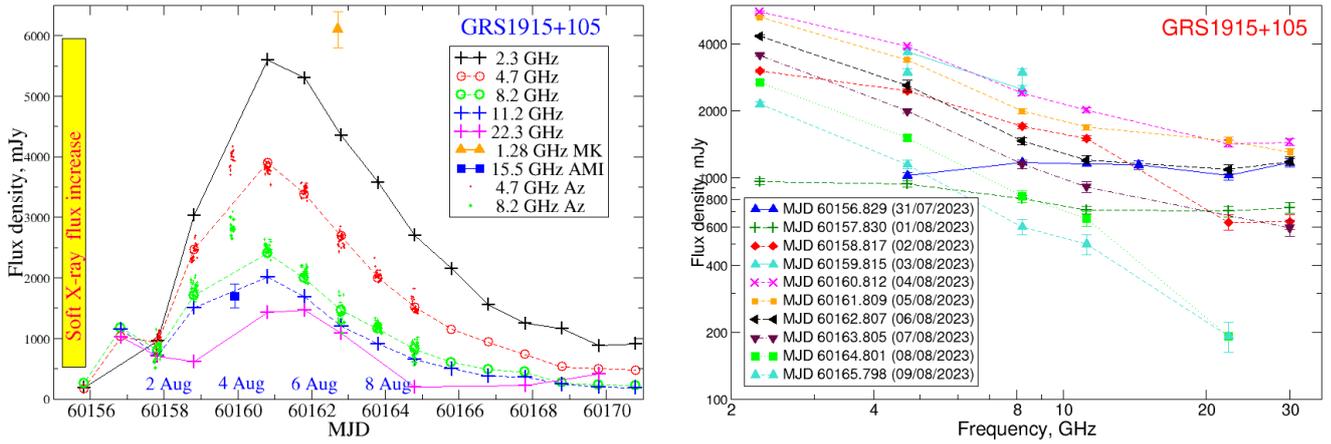


Рисунок 20 — Кривые блеска и радиоспектры в августе 2023 г.

Эта вспышка с почти плоским радиоспектром на стадии роста потока стала самой яркой за всю историю наблюдений. С 1 августа 2023 года в течение двух недель проводились алертные внутрисуточные измерения. Впервые за 30-летнюю историю изучения микроквара, наблюдалась необычно яркая для данного микроквара вспышка, которая проливает свет на физику аккреции на ЧД звездных масс и формирование мощных коллимированных струй.

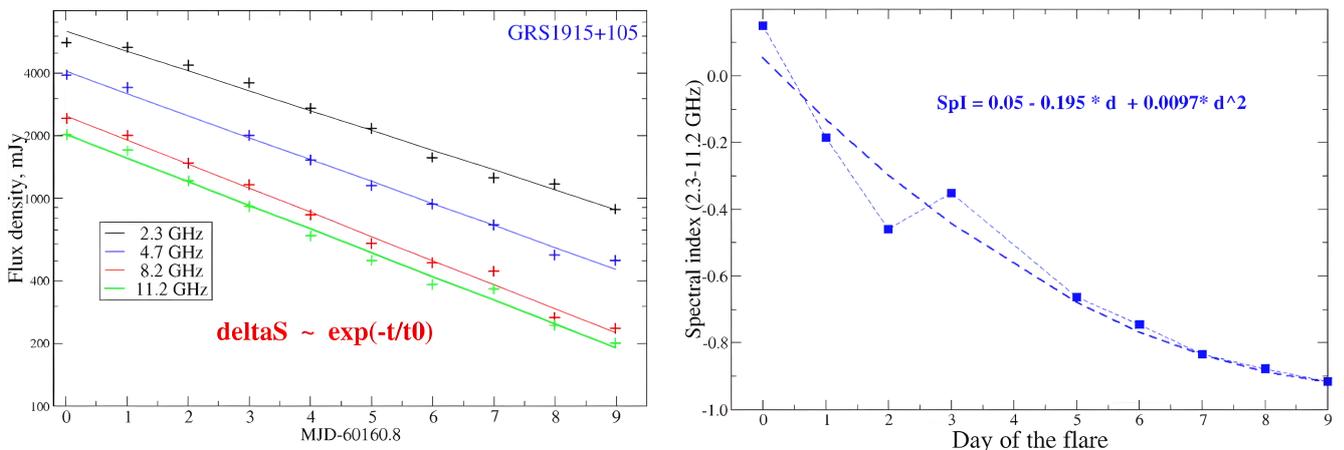


Рисунок 21 — Кривые блеска (слева) и эволюция спектрального индекса (справа) на стадии затухания вспышки в августе 2023 г.

Экстремально яркая вспышка микроквара GRS 1915+105 произошла после перехода источника в крайне низкое и жесткое рентгеновское состояние.

Яркость вспышки достигла 5.5 Ян на частоте 2.3 ГГц (то есть радиосветимость выросла до  $10^{35}$  эрг/с, что выше когда-либо зарегистрированных значений за 30 лет с момента открытия объекта. Далее впервые мы проследили эволюцию вспышки на двух частотах 4.7 и 8.2 ГГц в новом режиме МА наблюдений, когда измерения проводились каждые 8.6 минуты 31 раз в сутки. Радиовспышка сопровождалась постепенным ростом потока в мягком рентгеновском диапазоне (МАХИ, 2-20 кэВ). В оптически тонкой части радиоспектра синхротронного излучения, спектральный индекс плавно изменился от +0.15 до  $-0.95$  за первые восемь дней. Затухание вспышки хорошо описывается экспоненциальным законом. (Рис. 21).

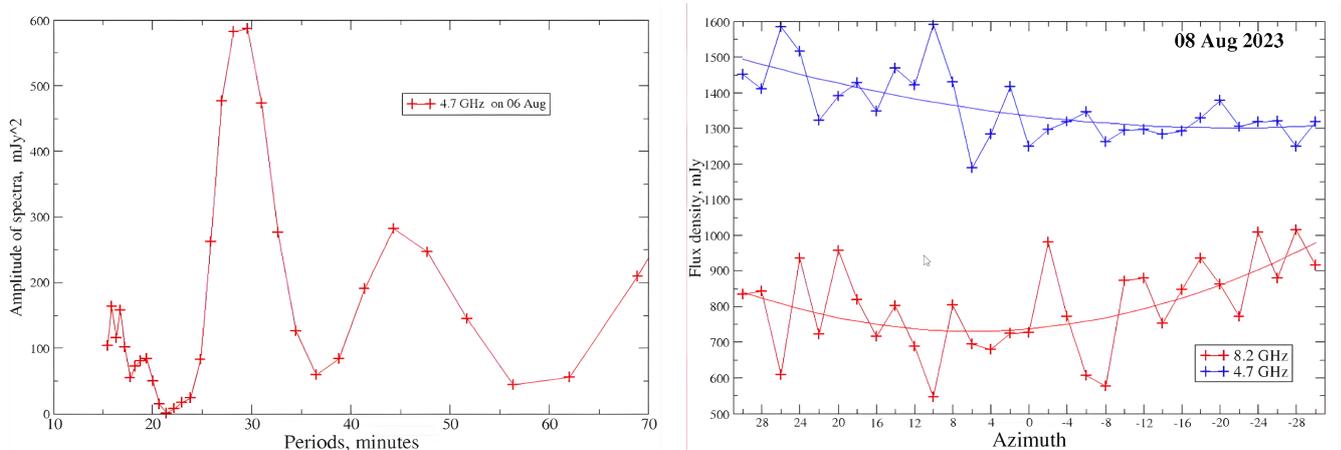


Рисунок 22 — КПО обнаруженные во внутрисуточных кривых блеска 6 и 8 августа 2023 г.

Обнаруженные вариации потока на временах от 30 до 300 минут соответствуют физическому размеру области радиоизлучения от 4 до 40 астрономических единиц, вероятно, внутри струйного выброса. В восьми МА-измерениях впервые обнаружены квазипериодические осцилляции с амплитудой до 10% от среднего потока на временных интервалах от 30 до 100 минут (Рис. 22). Мы связываем эту гигантскую вспышку GRS 1915+105 с формированием релятивистских струйных выбросов в процессе снижения аккреции вещества с нормальной звезды, когда, как стало позже известно, сильный дисковый ветер одновременно и затеняет основной рентгеновский поток и снижает темп аккреции. Очевидное сходство вспышечного события в GRS 1915+105 с гигантскими вспышками в микроквазарах Cygnus X-3, SS 433 и Swift J1727.8-1613 подразумевает подобные физические процессы аккреции на черные дыры звездных масс.

#### 2.2.4 Выводы

Долговременный мониторинг GRS 1915+105 в широком радиодиапазоне на телескопе РАТАН-600 продемонстрировал четкую связь между яркими радиовспышками и ростом рентгеновского потока. Максимумы радиоизлучения наблюдались после быстрых рентгеновских вспышек в жестком диапазоне, что указывает на активные процессы во внутренних областях аккреционного диска, которые запускают СВ.

С 2019 по 2021 годы наблюдались целые серии умеренно ярких вспышек, когда радиопоток на частотах 4.7 и 11.2 ГГц достигал уровня 500-900 мЯн. Это свидетельствует о том, что аккреционные процессы в системе нестабильны и могут быстро активизироваться. Ежедневное патрулирование GRS 1915+105 также показало, что система может находиться в радиотихом состоянии с минимальным потоком в течение длительного времени, а затем резко переходить в активную фазу с интенсивными СВ. Анализ эволюции радиоспектров показал постепенный переход от оптически толстого синхротронного излучения к оптически тонкому. Спектры изменялись со временем, что указывает на расширение плазмонов. Эти результаты подтверждают теоретические модели синхротронного излучения, согласно которым энергия струй распределяется по диапазонам по мере их удаления от центрального объекта.

В 2023 году было зарегистрировано две ярчайших радиовспышки с плотностью потока более 1 Ян на частотах 4.7 и 11.2 ГГц. Данные мониторинга рентгеновского излучения указывают на сильные изменения в аккреционном диске, которые инициировали мощные выбросы. По результатам внутрисуточного мониторинга были обнаружены квазипериодические осцилляции с временными интервалами около 30-300 минут, что соответствует физическим размерам области формирования радиоизлучения в пределах 4-40 астрономических единиц. Эти результаты указывают на внутренние нестабильности в струях, что важно для дальнейшего изучения природы выбросов и их взаимодействия с окружающей средой.

## 2.3 LS I+61° 303

### 2.3.1 Введение

В 1984 году радиоастрономы Грегори и Тейлор обратили внимание на объект в Кассиопее, когда проводили обзор плоскости Галактики на 90-м телескопе НРАО на частоте 4.8 ГГц с целью обнаружить новые переменные радиосточники, которые можно было бы связать с объектами, подобными SS 433. Действительно, ученым удалось найти переменный источник GT0236+61, отождествленный с двойной звездой LS I+61°303, в состав которой входит Be-звезда. Он оказался не только ярким рентгеновским источником и оптической звездой, но был единственным радиосточником с периодическими вспышками, которые следовали с орбитальным периодом 26.5 суток [169]. Радионаблюдения доказывают, что в каждом орбитальном цикле происходит мощная радиовспышка, амплитуда которой подвержена долговременной модуляции ([170], [171], [172]).

Когда удалось определить параметры орбиты ( $e = 0.72 \pm 0.15$ ) [173], то стало ясно, что эти вспышки происходят после прохождения периастроны (точки максимального сближения) Be-звезды и релятивистского объекта. Вероятно, в процессе сближения нарастает аккреция вещества на НЗ, после чего формируются СВ, которые мы видим, как периодические вспышки.

Жаркие споры разгорелись по интерпретации радиокарт, полученных на интерферометре VLBA в течение одной орбиты. По мнению американского радиоастронома В. Давана, большая ось распределения радиояркости объекта всегда была направлена в сторону оптической звезды, что скорее напоминало ориентацию хвоста кометы, чем обычный для микроквazarов струйный выброс.

Масси придерживается точки зрения, что релятивистские быстро прецессирующие струйные выбросы создают основной узор и мы имеем дело с типичной для микроквazarов картиной образования струй в процессе аккреции на НЗ. Если первая точка зрения, скорее, предполагает взаимодействие пульсарного ветра или магнитосферы нейтронной звезды с дисковым ветром Be-звезды, то Масси настаивает на образовании струйных выбросов, в следствие периодически возникающей аккреции вещества на релятивистский компонент, что связано с сильной вытянутостью орбиты рентгеновской двойной системы. Открытие гамма-излучения от системы LS I + 61°303, указывает на то, что и

микровазары могут быть мощными источниками излучения высоких энергий, измеряемых в тераэлектронвольтах.

РСДБ-карты показали, что радиоизлучение исходит из структуры размером в несколько миллисекунд дуги, что соответствует нескольким а.е. на расстоянии 2 кпк до источника [174]. Последующие наблюдения показали, что морфология радиоисточника меняется - иногда наблюдается односторонняя структура, иногда двухсторонняя, а позиционный угол также варьируется (Пе-ракола и др. [175], [176], Тэйлор и др. [177], Масси и др. [178], [179]).

Это и привело к предположению, что LS I+61°303 может быть прецессирующей РДС [180]. Прецессия джета приводит к изменению угла между джетом и лучом зрения, что вызывает переменное доплеровское усиление излучения. Результатом является непрерывное изменение как позиционного угла радиоизлучающей структуры, так и ее плотности потока [181].

Наблюдения с помощью интерферометра MERLIN выявили быстрые изменения позиционного угла до 60° в сутки [180]. Это было подтверждено в VLBA-наблюдениях [182], которые зафиксировали вращение примерно на 5°–7° за 2.5 часа (т.е. около 60° в день). Радиоастрометрические измерения указали на период прецессии  $\sim 27$  дней [183].

Анализ архивных радиоизмерений GB1 показал наличие двух близких частот:  $P_1 = 26.49 \pm 0.07$  дней и  $P_2 = 26.92 \pm 0.07$  дней [184]. Период  $P_1$  согласуется со значением  $26.4960 \pm 0.0028$  дней [171], связанным с орбитальным периодом двойной системы и предсказанным периодическим максимальным темпом аккреции. Период  $P_2$  хорошо согласуется с оценкой  $\sim 27$  дней для периода прецессии, полученной методом радиоастрометрии.

Периоды  $P_1$  и  $P_2$  были подтверждены, как устойчивые характеристики в более поздних мониторингах гамма-излучения с помощью Fermi/LAT [185] и радиоизлучения с помощью OVRO [186], что также подтверждается в кривых блеска по данным мониторинга на телескопе РАТАН-600 (Рис. 23).

Важно отметить, что сочетание  $\nu_1$  и  $\nu_2$  дает  $P_{average} = 2/(\nu_1 + \nu_2) = 26.70 \pm 0.05$  дней и  $P_{beat} = 1/(\nu_1 - \nu_2) = 1667 \pm 393$  дней [184]. Другими словами, биение  $P_1$  и  $P_2$  создает  $P_{beat}$  (т.е.  $P_{long}$ ), который модулирует их среднее значение  $P_{average}$ . Вероятно, LS I + 61°303, по-видимому, является случаем "биений" – явления, возникающего, когда два физических процесса создают стабильные вариации с почти равными частотами. Малая разница в частотах создает долговременную вариацию с периодом  $1/(\nu_1 - \nu_2)$ .

В работе [187] показано, что две периодичности  $P_1$  и  $P_2$  связаны с двумя физическими процессами: периодическим ( $P_1$ ) увеличением релятивистских электронов в коническом джете из-за вариаций темпа аккреции, и периодическим ( $P_2$ ) доплеровским усилением наблюдаемого излучения релятивистских электронов из-за прецессии джета. Синхротронное излучение такого джета, рассчитанное и подогнанное к наблюдениям GBI, воспроизводит как долговременную модуляцию, так и орбитальный фазовый сдвиг радиовспышки [187]. Пик долговременной модуляции происходит, когда плотность электронов в джете близка к максимуму, а приближающийся джет образует наименьший возможный угол с лучом зрения. Это совпадение максимального числа излучающих частиц и максимального доплеровского усиления их излучения происходит каждые 4.6 года и создает долговременную модуляцию.

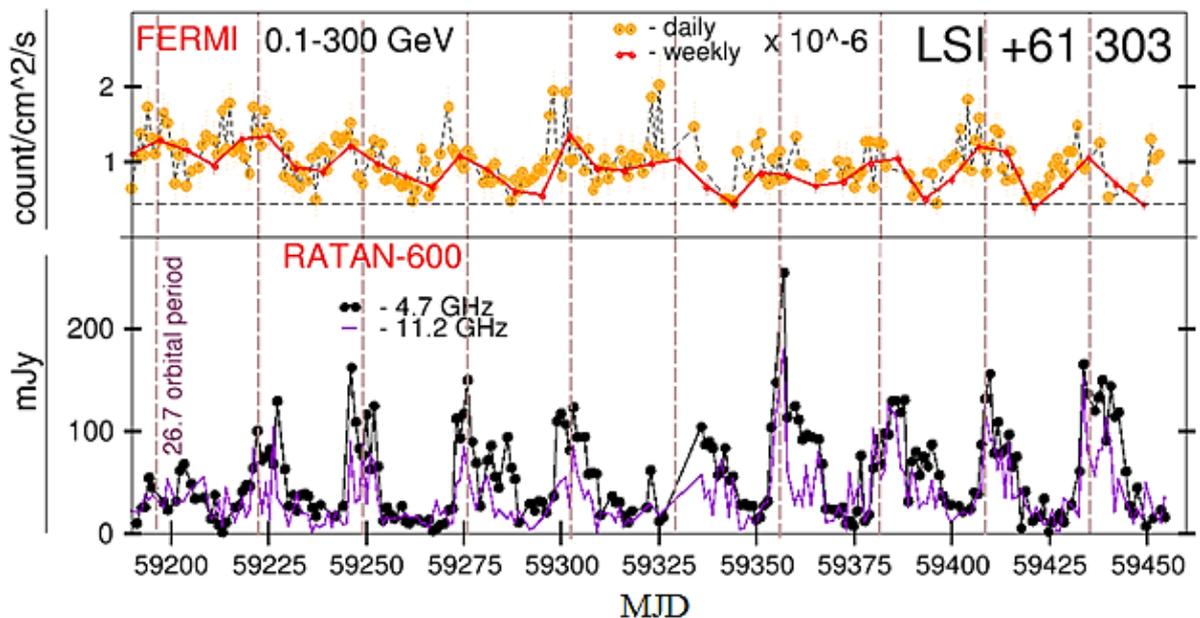


Рисунок 23 — Кривые блеска десяти орбитальных периодов в радио (4.7 и 11.2 ГГц) и гамма-диапазонах (0.1-300 ГэВ) в течение 2020-2021 гг.

Недавние исследования указывают на то, что LS I + 61°303 — единственный периодически вспыхивающий микроквazar (Рис. 23), обнаруженный, как транзиентный радиопульсар с периодом около 269 мс [188]. Свойства в радиодиапазоне на данный момент весьма противоречивы. Впервые у микроквзара с НЗ и периодическим излучением наблюдаются признаки эжектора вдоль своей орбиты и пропеллера близко к перицентру орбиты. На радиокартах LS I+61°303 имеет или кометообразную структуру [182], или показывает себя как прецессирующую 'струи-подобную' структуру [183].

### 2.3.2 Периодичные вспышки в радиодиапазоне

С 2013 года осуществляется ежедневный мониторинг LS I+61°303 на телескопе РАТАН-600. Наблюдения покрывают два сверхорбитальных периода, на двух частотах. Измерены кривые блеска в течение более чем 120 орбитальных периодов. На Рис. 24 видно, что свойства вспышек заметно меняются с изменением фазы. Для анализа периодичностей в кривых блеска использовался метод анализа нерегулярных временных рядов Ломба-Скаргла [59], [60]. Общий временной интервал составляет  $\sim 2875$  дней в течение MJD 56600-59757, исключая неясную картину радиовспышек в пределах MJD 56960-57730. Мы обнаружили две явных гармоник с периодами 26.47 дней и 26.93 дней. Периоды, найденные в данных GVI показаны пунктирными вертикальными линиями.

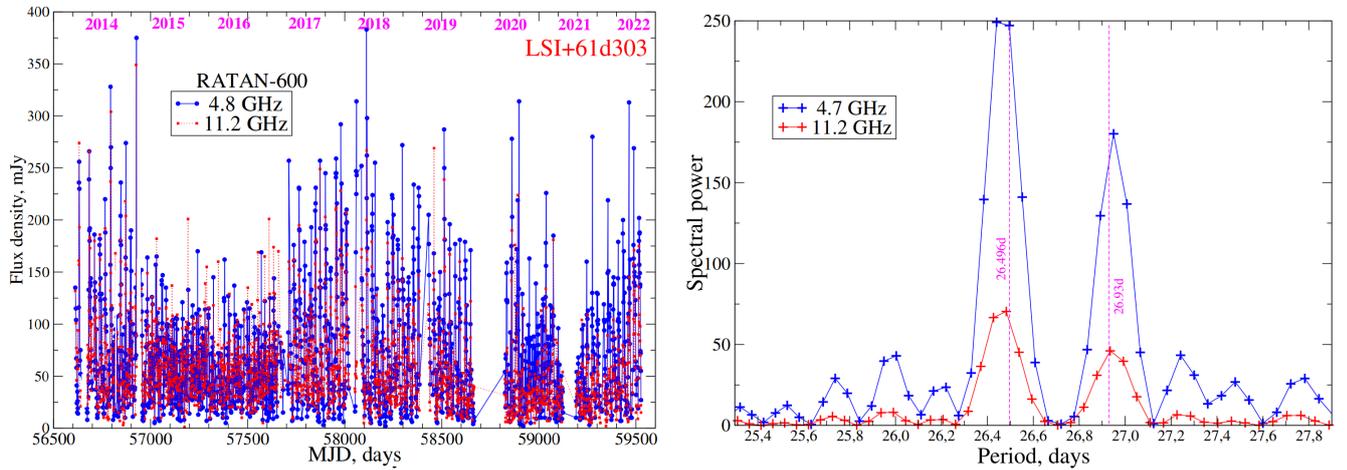


Рисунок 24 — Долговременные кривые блеска (слева) и обнаруженные периодичности (справа) по данным мониторинга на телескопе РАТАН-600.

Биение найденных нами гармоник (26.49 и 26.93 дней) формально дает сверхорбитальный период  $\approx 1600$  дней, хотя ясно, что это значение сильно зависит от разницы этих гармоник [189]. Существование сверхорбитального периода  $\sim 1600$  дней остаётся важной проблемой данной РДС. Вероятно, этот период является отражением биений близких периодов — орбитального (26.49 дней) и прецессионного одного из струй (26.95 дней).

На Рис. 25 показаны средние значения кривых блеска по фазам для последних 15 орбит и эволюция радиоспектра. Спектральный индекс соответствует степенному закону, а радиоизлучение эволюционирует в соответствии с обычным поведением синхротронно излучающих радиокомпонент в струях: от инвертированного ( $\alpha > 0$ ) к крутому ( $\alpha < 0$ ), а начало и окончание каждого орбитального цикла характеризуется плоским спектром.

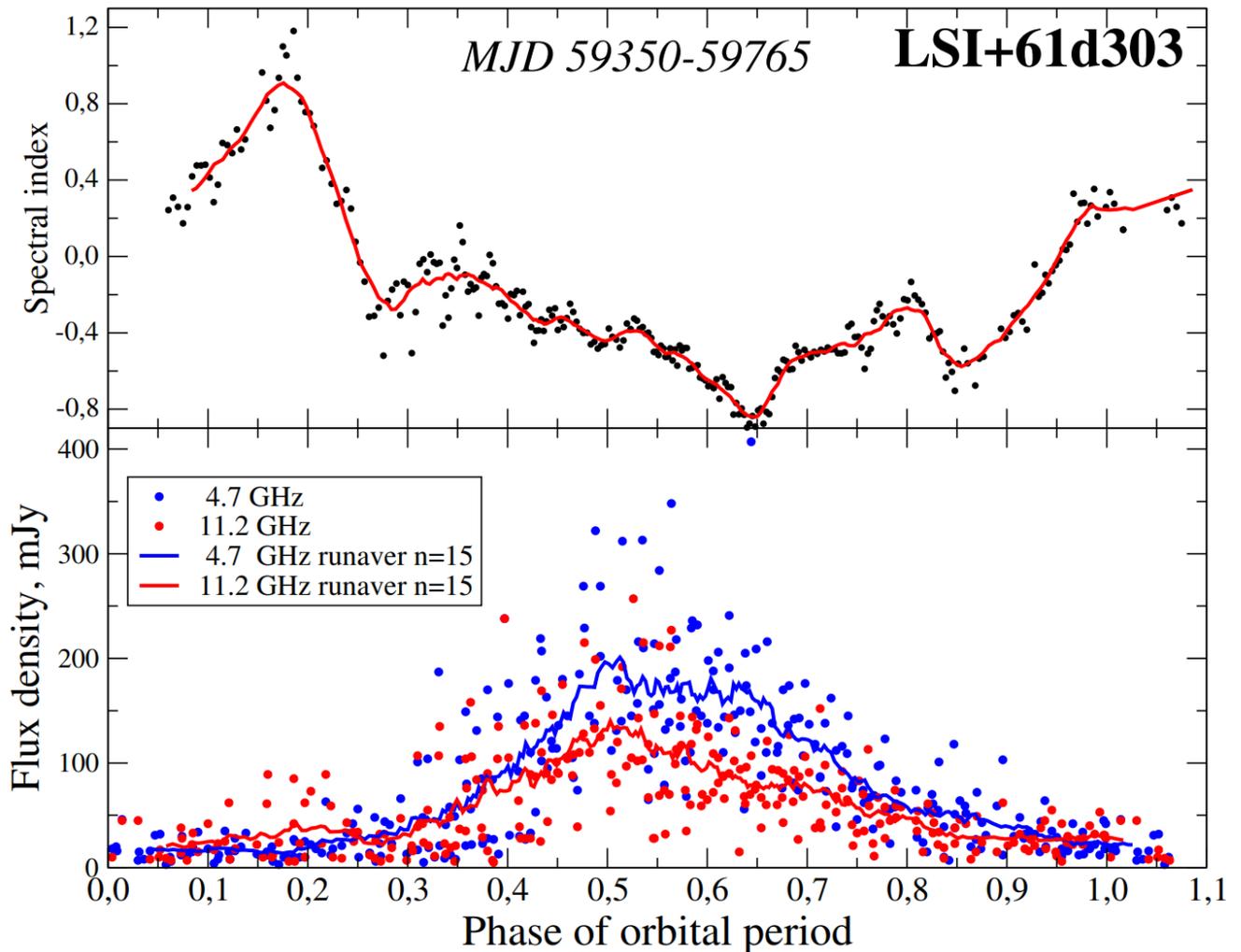


Рисунок 25 — Орбиты усреднённые по 15 периодам на интервале MJD 59350-59765

### 2.3.3 Выводы

Наблюдения на телескопе РАТАН-600 подтвердили наличие четкой периодичности вспышек в системе LS I + 61°303 с орбитальным периодом около 26.47 дней. Эти данные согласуются с предыдущими наблюдениями и подтверждают теорию о том, что радиовспышки вызваны аккрецией вещества на компактный объект (нейтронную звезду или черную дыру) после прохождения перицентра [189]. Наблюдения выявили прецессию струй с периодом около 26.95 дней, что было подтверждено радиоастрометрическими измерениями. Прецессионные движения струй влияют на интенсивность радиоизлучения, создавая доплеровские усиления в зависимости от угла наклона струй к линии зрения. Эти результаты подтверждают гипотезу о том, что LS I + 61°303 является прецессирующим микроквazarом [189].

Исследование радиоспектров показало, что радиовспышки в системе представляют собой синхротронное излучение релятивистских частиц, ускоряющихся в СВ. Переходы от оптически толстого к оптически тонкому спектру во время вспышек подтверждают наличие мощных выбросов материи в дже-тах, которые взаимодействуют с окружающим веществом и создают ударные волны. Кроме основной орбитальной периодичности, в системе была обнаружена долговременная модуляция с периодом около 1600 дней. Эта модуляция, вероятно, связана с биениями между орбитальным и прецессионным периодами, что является уникальной характеристикой системы LS I + 61°303 среди микроквazarов[171]. Для дальнейшего изучения физики струй и природы компактного объекта необходимы дополнительные наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах, чтобы точно определить механизм взаимодействия между компактным объектом и звездой.

### Глава 3. Эволюция радиоизлучения гигантских вспышек в системе Cygnus X-3 в широком диапазоне на разных временных масштабах

Cygnus X-3 – микроквazar с релятивистскими СВ, включающий массивную звезду Вольфа-Райе [190] и компактный объект (ЧД/НЗ). Орбитальный период этой системы, определенный в ИК-диапазоне и по рентгеновским данным составляет 4.8 часа [191], то есть система очень компактна, а интенсивный звездный ветер от звезды-донора является одним из ключевых факторов, влияющих на особенности наблюдаемых СВ в периоды ярких вспышек. Как рентгеновский источник объект был обнаружен в 1967 году [192], а мощные радиовспышки Cygnus X-3 наблюдаются с 1972 года, когда в серии из 22 работ в журнале "Nature" были подробно обсуждены свойства переменного радиоизлучения (см. [193]). Длительный мониторинг радиоизлучения был проведен в 1980–1990-е годы [194; 195] на интерферметре GBI (НРАО, США). С запуском космических рентгеновских аппаратов (RXTE, BATSE, Swift) с ежедневными программами мониторинга стало ясно, что радиовспышки и рентгеновский поток всех микроквазаров сильно коррелируют [196]. Такая особенность получила наименование "сцепки" (disk-jet coupling) различных процессов в РДС, обеспечивающих процесс аккреции вещества на релятивистский объект. Это в полной мере относится и к Cygnus X-3, для которого была построена эволюционная зависимость, диаграмма "жесткость – интенсивность" рентгеновского излучения, в целом напоминающая подобные диаграммы для других рентгеновских двойных с аккрецирующими черными дырами [197]. На луче зрения Лебедь X-3 находится молекулярное облако, которое создает сильное поглощение в видимом диапазоне, не позволяющее проводить оптическую спектроскопию. Расстояние до объекта равно 7.2 кпк. Гамма-излучение Cygnus X-3 также коррелирует со вспышечной активностью в радиодиапазоне [19; 198] и интенсивно исследуется на космических обсерваториях Fermi/LAT<sup>1</sup> и AGILE. Подробный анализ одновременных радио- (AMI-LA) и гамма- (Fermi/LAT) измерений был выполнен в работе [199]. В обоих диапазонах обнаружена слабая модуляция излучения орбитальным периодом. Картографирование объекта на РСДБ-системе проводилось неоднократно, и были обнаружены СВ с релятивистскими движениями компонент струй [200; 201]. Иногда такие движения

<sup>1</sup>[https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl\\_lc/source/Cygnus\\_X-3](https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl_lc/source/Cygnus_X-3)

были интерпретированы как сверхсветовые, что, скорее всего, объясняется как движение в струях, направленных под малым углом к лучу зрения [202]. Очевидно, что при этом уменьшается и временной масштаб переменности.

Cygnus X-3 выделяется среди микроквазаров происходящими время от времени гигантскими радиовспышками, когда за несколько дней потоки могут вырасти в тысячи раз от предвспышечного уровня [195]. Эти гигантские вспышки происходят сразу после завершения состояния почти полного затухания, то есть после того, как радиопоток в течение одной-трех недель держится на уровне ниже 5–20 мЯн в диапазоне 4–11 ГГц [103]. Такой период низкого радиопотока также характеризуется гипермягким рентгеновским состоянием, в течение которого поток в жестком рентгене (15–50 кэВ) падает до нуля, а поток в мягком рентгене ( $< 15$  кэВ) остается на высоком уровне, если даже не повышается [197]. Вероятно, в таком состоянии почти полностью пропадают релятивистские радиоджеты. Внутрисуточная переменность Cygnus X-3 регистрировалась неоднократно, особенно в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн, что не удивительно, так как размеры системы компактны, струи являются релятивистскими, а поглощение высоких радиочастот невелико. Однако именно одновременные многочастотные измерения представляют особый интерес для детального сопоставления и для поиска новых закономерностей.

### 3.1 Наблюдения яркой вспышки совместно с низкочастотными данными LOFAR

За последние несколько десятилетий исследовано множество радиовспышек от источника Cygnus X-3, но не так много наблюдений проводилось на низких частотах ( $\leq 400$  МГц). После первой зарегистрированной гигантской вспышки в сентябре 1972 года [203; 204] проводились мониторинговые наблюдения на частоте 365 МГц с помощью Широкополосного Синтезирующего Интерферометра Техасского Университета. Низкочастотные наблюдательные кампании, которые также включали одновременные или близкие по времени наблюдения на более высоких частотах, проводились в сентябре 2001 года, мае-июне 2006 года, июне 2007 года, а также в апреле и декабре 2008 года ([200; 201; 205–208]). Наблюдения проводились на частотах 74 и 330 МГц с помощью

Very Large Array им. Карла Янского (JVLA), на частоте 140 МГц с помощью радиотелескопа Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT), а также на частотах 244 и 325 МГц с помощью Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT). В результате этих исследований показано, что Cygnus X-3 на низких частотах характеризуется как переменный источник, с измеренными плотностями потока до 7.9 Ян (на 365 МГц [204]), хотя на частоте 74 МГц были получены только верхние пределы [200].

В периоды ярких событий 1972, 2001, 2006, 2007 и 2008 годов наблюдалось смещение частоты максимума радиоспектра в сторону более низких частот по мере развития каждой вспышки [209]; [200; 201]; [206—208]). Спектральный индекс  $\alpha$ , эволюционировал в сторону укрупнения спектра. Например, в течение девяти дней во время вспышки 2006 года двухточечный спектральный индекс  $\alpha_{244}^{614}$  изменился от значения +1.89 до  $-0.98$ , то есть от сильно инвертированного и оптически толстого до крутого и оптически тонкого [207]. Эволюция радиоспектра ярких вспышек неоднократно обсуждалась в рамках модели синхротронного облака, где излучающие плазменные сгустки становятся все менее оптически толстыми по мере их расширения и распространения наружу (см. [9; 210; 211]). Также были исследованы механизмы, объясняющие низкочастотный завал радиоспектра, а именно: синхротронное самопоглощение, свободно-свободное поглощение, эффект Разина-Цытовича и низкочастотный обрыв в синхротронном спектре.

Другое интересное исследование было проведено в [212], где были выполнены десять одновременных наблюдений Лебеда X-3 на частотах 235 и 610 МГц с помощью GMRT в период с июля 2003 по январь 2005 года. Хотя ярких вспышек обнаружено не было, было установлено, что источник является переменным на частоте 235 МГц: плотность потока на 235 МГц варьировалась от 4.9 до 49 мЯн, со средним значением 18 мЯн. Для всех наблюдений были зарегистрированы инвертированные радиоспектры, причем двухточечный спектральный индекс  $\alpha_{235}^{610}$  варьировался от +0.09 до +1.23.

Наблюдения вспыхивающих рентгеновских двойных звёзд неоднократно проводились и на других низкочастотных радиотелескопах: Low-Frequency Array (LOFAR), Murchison Widefield Array (MWA) и VLA Low-Band Ionosphere and Transient Experiment (VLITE). В сочетании с наблюдениями на более высоких частотах, на основе этих данных были получены строгие ограничения на широкополосные спектральные свойства вспышек.

### 3.1.1 Совместные измерения яркой вспышки

В начале февраля 2019 года данные мониторинга Cygnus X-3 на телескопе РАТАН-600 показали, что радиопоток источника постепенно уменьшался, вероятно наблюдался переход из спокойного состояния ( $\sim 100 - 300$  мЯн) до почти угасшего ( $\sim 10 - 50$  мЯн). Радиопектр 17 февраля 2019 года (MJD 58531.332) был крайне инвертированным со спектральным индексом  $\alpha_{4.7}^{30} = +1.57$  (см. Рис. 26), что может быть связано с компактными оптически толстыми джетами [213]. По данным орбитальной обсерватории Swift/BAT<sup>2</sup> (15-50 кэВ) наблюдалось состояние почти нулевого жесткого рентгеновского излучения.

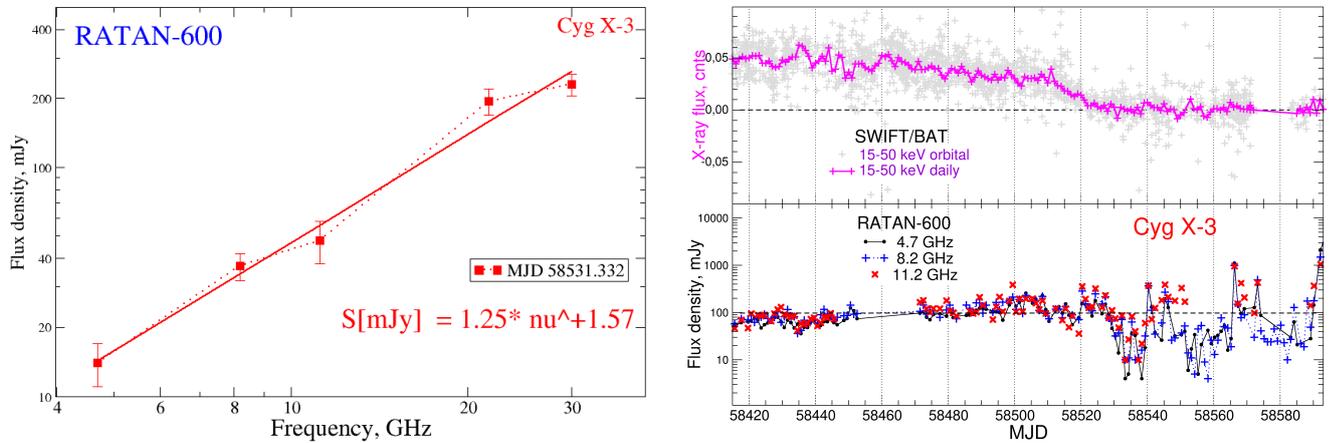


Рисунок 26 — Радиоспектр в спокойном состоянии системы в феврале 2019 года (слева). Эволюция рентгеновского и радиоизлучения при переходе системы в мягкое состояние весной 2019 года (справа).

На Рис. 26 показаны кривые блеска радио и жесткого рентгеновского излучения в течение перехода системы из жесткого состояния в мягкое перед гигантской вспышкой.

Подобное поведение радиоизлучения было обнаружено еще Уолтмэн и др. [195], как индикатор скорого появления гигантской вспышки. Доказано, что Cygnus X-3 всегда проходит через так называемое гипермягкое рентгеновское состояние перед мощными выбросами (МакКоллоу и др. [214], Колийонен и др. [197], Трушкин и др. [103]). Последний раз такое состояние регистрировалось в июле 2018 года (MJD 58337-350) [215].

Действительно, спустя  $\sim 70$  дней с момента перехода системы в гипермягкое состояние, 17 апреля 2019 года в наблюдениях на РАТАН-600 была

<sup>2</sup><https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/CygX-3/>

зарегистрирована яркая вспышка. Активность продолжалась и в мае 2019 года ([216–218]; также см. результаты мониторинга [219; 220] в гамма- и [221] в рентгеновском диапазоне). На основе одновременных наблюдений был проведен комплексный анализ спектральных и временных характеристик вспышки.

Наблюдательная кампания LOFAR началась примерно через 15 дней после первоначального обнаружения вспышки в радиодиапазоне. Было проведено 8 наблюдений с суточной периодичностью для первых шести сеансов, затем с промежутками в три и шесть дней для последних двух сеансов. Даты наблюдений, плотность потока, ошибки измерений, а также калибровочные коэффициенты приведены в Табл. 8. Ошибки измерений плотности потока даны на уровне  $1\sigma$  и не включают систематические эффекты (см. раздел 3 в [222] для дополнительных деталей).

Таблица 8 — Журнал наблюдений LOFAR [222]

| Сеанс | Дата        | MJD       | $S_{143.5}$<br>(Ян) | Уровень<br>шума<br>(мЯн/луч) | Поправочный<br>коэффициент<br>потока ( $\times$ ) | Угловое разрешение<br>и РА (угл.сек <sup>2</sup> ; град.) |
|-------|-------------|-----------|---------------------|------------------------------|---|---|
| 1     | 2 мая 2019  | 58605.344 | $2.08 \pm 0.37$     | 51                           | $2.33 \pm 0.37$                                   | $111 \times 88$ ; 80                                      |
| 2     | 3 мая 2019  | 58606.248 | $1.68 \pm 0.23$     | 62                           | $1.76 \pm 0.20$                                   | $98 \times 92$ ; -54                                      |
| 3     | 4 мая 2019  | 58607.318 | $2.50 \pm 0.58$     | 64                           | $2.27 \pm 0.51$                                   | $106 \times 90$ ; 89                                      |
| 4     | 5 мая 2019  | 58608.225 | $1.84 \pm 0.21$     | 58                           | $1.44 \pm 0.13$                                   | $98 \times 92$ ; -45                                      |
| 5     | 6 мая 2019  | 58609.246 | $2.48 \pm 0.31$     | 88                           | $1.84 \pm 0.19$                                   | $98 \times 92$ ; -58                                      |
| 6     | 7 мая 2019  | 58610.246 | $2.62 \pm 0.63$     | 128                          | $2.28 \pm 0.50$                                   | $111 \times 99$ ; -47                                     |
| 7     | 10 мая 2019 | 58613.246 | $5.24 \pm 0.78$     | 154                          | $2.03 \pm 0.27$                                   | $99 \times 91$ ; -63                                      |
| 8     | 16 мая 2019 | 58619.246 | $5.82 \pm 0.72$     | 131                          | $1.80 \pm 0.20$                                   | $100 \times 91$ ; -72                                     |

Наблюдения на LOFAR проводились в конфигурации "HVA Dual Inner". Каждое наблюдение использовало 38 станций: 24 базовые станции и 14 удаленных станций. Все наблюдения состояли из 48 минут накопления сигнала источника Cygnus X-3, до или после которых следовал 10-минутный скан первичного калибратора (ЗС 295 или ЗС 48). Для анализа использовался диапазон 120-167 МГц (с центральной частотой 143.5 МГц) для уменьшения влияния радиочастотных помех и оптимизации чувствительности полосы пропускания. Телескоп LOFAR описан в работе ван Харлема и др. [223].

Построение изображений поля Лебедя X-3 с помощью LOFAR представляло сложность из-за наличия сложного протяженного излучения и близости очень яркого источника Cygnus A (на расстоянии  $6^\circ.2$ , с плотностью потока 10.7 кЯн на 150 МГц [224]). Калибровочные коэффициенты и скорректированные плотности потока, а также уровни шума приведены в Табл. 8.

Кривые блеска Cygnus X-3 представлены на Рис. 27 (Табл. 8 для данных LOFAR). Две пунктирные линии представляют собой средневзвешенные зна-

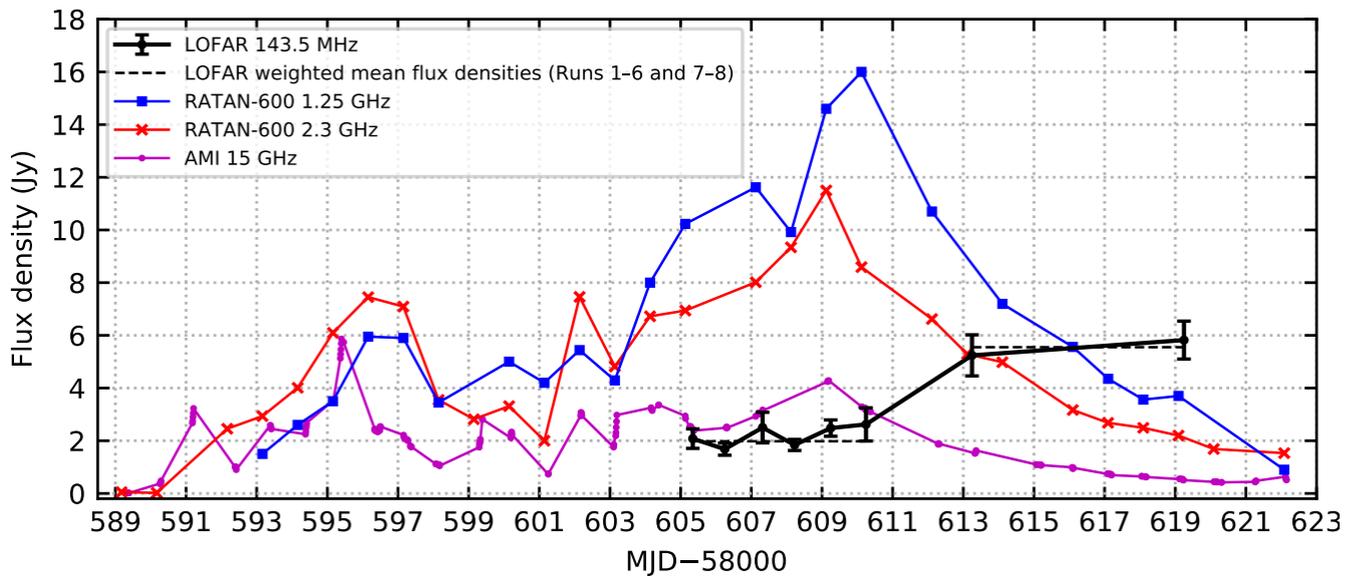


Рисунок 27 — Кривые блеска Cygnus X-3 по данным РАТАН-600, LOFAR и АМІ в апреле 2019 г. [222]

чения плотности потока для наблюдений 1-6 и 7-8 соответственно. Источник был достаточно ярким во всех восьми наблюдениях, существенно превышая уровень спокойного излучения. По данным LOFAR Cygnus X-3 имел примерно постоянную плотность потока с 2 по 7 мая (MJD 58605-58610), но затем яркость увеличилась между 7 и 10 мая (MJD 58610 и 58613). Средневзвешенные плотности потока для наблюдений 1-6 и 7-8 составили  $1.98 \pm 1.2$  и  $5.55 \pm 5.3$  Ян, что говорит о повышении средней плотности потока в  $2.8 \pm 0.3$  раз между данными интервалами.

Также представлены кривые блеска на 1.25 ГГц, 2.3 ГГц и 15 ГГц из одновременных наблюдений РАТАН-600 и АМІ. Ошибки измерений потока на РАТАН-600 составляют  $\sim 100 - 300$  мЯн на 1.25 ГГц и  $\sim 5\%$  на 2.3 (см. [222]).

Измерения РАТАН-600 для данной вспышки также можно найти в сообщении Трушкина и др. [218]. В качестве основного калибратора использовалась планетарная туманность NGC 7027. Для калибровки в диапазоне 1.25 ГГц использовался источник DR21. С радиотелескопом РАТАН-600 можно ознакомиться в работах Хайкина и др. [49] и Майоровой и др. [225].

На графике 27 также показаны 212 сканов мониторинга АМІ. Сканы проводились ежедневно по 5-10 минут, чередуясь с короткими измерениями калибратора J2052+3635. Основным калибратором был 3С 286, и дополнительные небольшие коррекции потока были сделаны с использованием J2052+3635. Ошибки измерений потока на АМІ составляют  $\sim 5\%$  на 15 ГГц. Телескоп подробно описан в работах Цварта и др. [226] и Хикиша и др. [227].

На кривых блеска [27](#) чётко обнаруживается яркая и продолжительная вспышечная активность Cygnus X-3 на высоких частотах с апреля по май 2019 года, с несколькими пиками радиопотока на каждой частоте. Плотность потока LOFAR первоначально оставалась относительно стабильной, хотя и на повышенном уровне по сравнению со спокойным состоянием системы. Это поведение, вероятно, связано с ожидаемой задержкой между отдельными вспышками на высоких и низких частотах. Очевидно, что в то время как кривые блеска на более высоких частотах достигли пика на MJD 58609 и 58610, а затем начали спадать, кривая блеска LOFAR явно показала задержанный рост плотности потока только после MJD 58610.

### 3.1.2 Широкополосные спектральные характеристики

Табл. [9](#) включает спектральные индексы, определенные из аппроксимации по трем точкам между 1.25 и 15 ГГц на момент наблюдений (MJD) для каждой точки LOFAR.

$$S_\nu = S_0 \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^\alpha \quad (8)$$

где  $S_0$  – плотность потока на опорной частоте ( $\nu_0 = 8.125$  ГГц), то есть в середине частотного диапазона. Полученные значения  $\alpha$  вместе с соответствующей статистикой  $\chi^2$  также приведены в Табл. [9](#).

Таблица 9 — Плотность потока, двухчастотные спектральные индексы и интерполированные спектральные индексы для каждого сеанса LOFAR [\[222\]](#)

| Сеанс | MJD       | $S_{143.5}$<br>(Ян) | $S_{1250}$<br>(Ян) | $S_{2300}$<br>(Ян) | $S_{15000}$<br>(Ян) | $\alpha_{143.5}^{1250}$ | $\alpha_{1250}^{2300}$ | $\alpha_{2300}^{15000}$ | $\alpha_{\text{fitted}} \text{ и } \chi_{\text{red}}^2$<br>(1250-15000 МГц) |
|-------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| 1     | 58605.344 | $2.1 \pm 0.6$       | $10.4 \pm 0.2$     | $7.1 \pm 0.4$      | $2.45 \pm 0.12$     | $0.74 \pm 0.13$         | $-0.63 \pm 0.10$       | $-0.57 \pm 0.04$        | $-0.58 \pm 0.02; 0.21$  |
| 2     | 58606.248 | $1.7 \pm 0.4$       | $11.0 \pm 0.2$     | $7.5 \pm 0.4$      | $2.49 \pm 0.12$     | $0.86 \pm 0.11$         | $-0.63 \pm 0.09$       | $-0.59 \pm 0.04$        | $-0.60 \pm 0.02; 0.11$  |
| 3     | 58607.318 | $2.5 \pm 0.8$       | $11.3 \pm 0.2$     | $8.3 \pm 0.4$      | $3.17 \pm 0.16$     | $0.70 \pm 0.15$         | $-0.51 \pm 0.08$       | $-0.51 \pm 0.04$        | $-0.51 \pm 0.02; 0.0042$  |
| 4     | 58608.225 | $1.8 \pm 0.4$       | $10.4 \pm 0.2$     | $9.6 \pm 0.5$      | $3.68 \pm 0.18$     | $0.81 \pm 0.10$         | $-0.13 \pm 0.09$       | $-0.51 \pm 0.04$        | $-0.41 \pm 0.02; 8.7$   |
| 5     | 58609.246 | $2.5 \pm 0.6$       | $14.8 \pm 0.3$     | $11.1 \pm 0.6$     | $4.22 \pm 0.21$     | $0.82 \pm 0.11$         | $-0.47 \pm 0.09$       | $-0.52 \pm 0.04$        | $-0.50 \pm 0.02; 0.12$  |
| 6     | 58610.246 | $2.6 \pm 0.8$       | $15.7 \pm 0.3$     | $8.5 \pm 0.4$      | $3.16 \pm 0.16$     | $0.83 \pm 0.14$         | $-1.01 \pm 0.08$       | $-0.53 \pm 0.04$        | $-0.66 \pm 0.02; 22$  |
| 7     | 58613.246 | $5.2 \pm 1.3$       | $8.7 \pm 0.3$      | $5.2 \pm 0.3$      | $1.55 \pm 0.08$     | $0.24 \pm 0.12$         | $-0.84 \pm 0.11$       | $-0.65 \pm 0.04$        | $-0.69 \pm 0.03; 2.1$   |
| 8     | 58619.246 | $5.8 \pm 1.4$       | $3.6 \pm 0.2$      | $2.1 \pm 0.1$      | $0.50 \pm 0.03$     | $-0.22 \pm 0.11$        | $-0.88 \pm 0.12$       | $-0.77 \pm 0.04$        | $-0.79 \pm 0.03; 0.70$  |

Характеристики радиоспектров (Табл. [9](#)) значительно варьировались в течение наблюдательной кампании, как с точки зрения яркости, так и наклона спектра. На Рис. [28](#) представлены широкополосные радиоспектры на момент

(MJD), соответствующий наблюдениям 1, 5, 6, 7 и 8 телескопа LOFAR. Изначально, выше 1.25 ГГц, спектр хорошо аппроксимировался степенным законом со спектральным индексом  $-0.58 \pm 0.02$ . Ниже 1.25 ГГц спектр разворачивался, и двухчастотный спектральный индекс  $\alpha_{143.5}^{1250}$  определялся, как оптически толстый ( $+0.74 \pm 0.13$ ). К концу наблюдений широкополосный спектр явно эволюционировал, где  $\alpha_{143.5}^{1250}$  характеризовался плоским и оптически тонким ( $-0.22 \pm 0.11$ ), а выше 1.25 ГГц спектральный индекс стал еще круче до  $-0.79 \pm 0.03$ . Простое объяснение вариаций радиоспектра заключается в том, что по мере того как синхротронно-излучающие плазмоны расширялись при движении от системы, они постепенно становились менее оптически толстыми на низких частотах, и впоследствии частота завала спектра смещалась к более длинным волнам по мере затухания вспышки в высокочастотном диапазоне.

По данным из Табл. 9 (Рис. 28) ясно видно, что аппроксимация одиночным степенным законом подходит для большинства наблюдений. Однако наиболее заметные расхождения обнаруживаются для наблюдений 4 и 6. Необходимо отметить, что для наблюдения 4 обнаружился однодневный спад плотности потока на 1.25 ГГц за несколько дней до того, как вспышка достигла пика на этой частоте. В наблюдении 6 вспышка достигала пика на 1.25 ГГц, но уже начала затухать на 2.3 и 15 ГГц. Поэтому стандартная задержка в эволюции радиоизлучения с уменьшением частоты, вероятно, объяснила бы любое отклонение от единого степенного закона в наблюдении 6. Эта задержка также объяснила бы, почему  $\alpha_{1250}^{2300}$ ,  $\alpha_{2300}^{15000}$ , а также  $\alpha_{1250}^{15000}$  либо явно следуют, либо показывают тенденцию сначала уплотняться по мере того, как вспышка достигала пика на более высоких частотах, а затем становиться круче.

На Рис. 28 линии не являются аппроксимацией к данным, но иллюстрируют, как двухчастотный спектральный индекс менялся как функция частоты в конкретном наблюдении. Наблюдение 1 показывает начальную форму радиоспектра, когда началась наблюдательная кампания, наблюдения 5 и 6 были очень близки к пику вспышечной активности, измеренной на более высоких частотах, а наблюдения 7 и 8 представляют особый интерес из-за значительного увеличения плотности потока в диапазоне LOFAR. Широкополосный радиоспектр очевидно эволюционировал в ходе вспышки.

Широкополосный спектр на высоких частотах также все еще становился круче в конце наблюдательной кампании, причем спектральный индекс не достиг возможного конечного значения, как это наблюдалось в некоторых

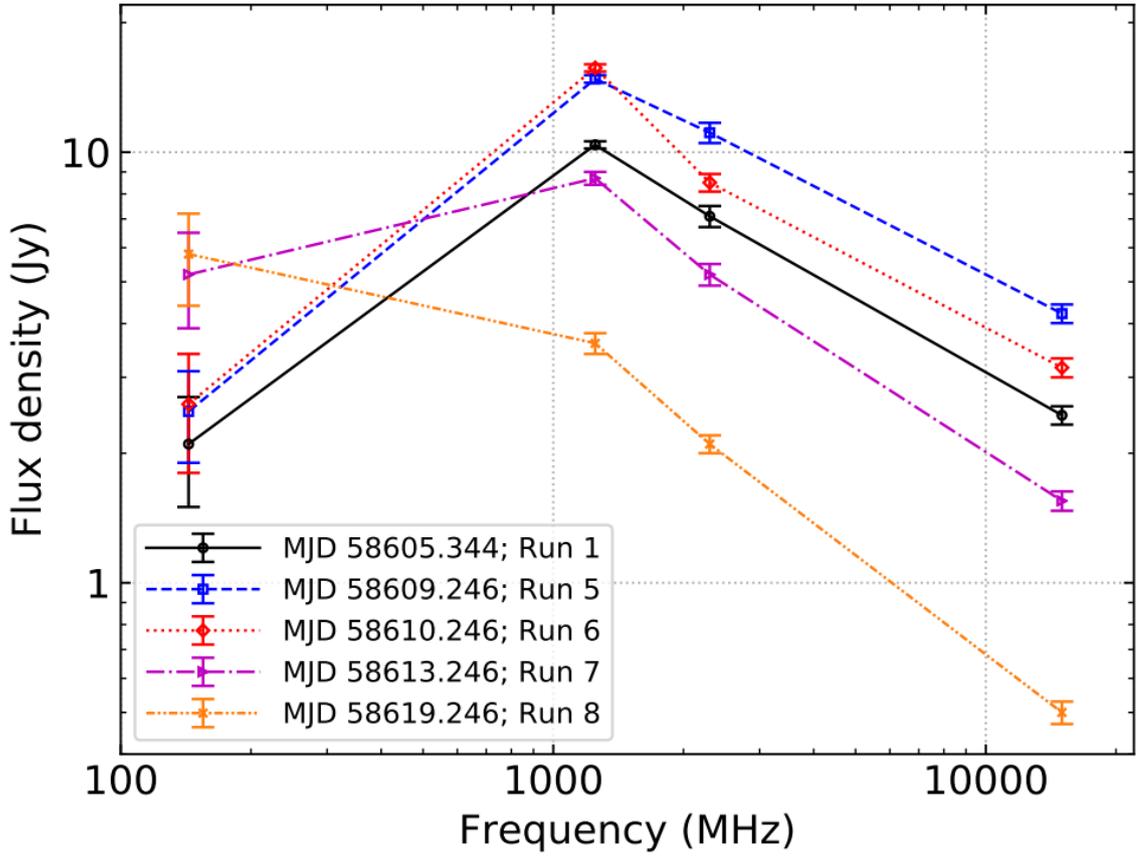


Рисунок 28 — Радиоспектры наблюдений 1, 5, 6, 7 и 8 по данным Табл. 9 [222]

предыдущих исследованиях (например, в [200]). Напротив, через три дня после окончания наблюдений LOFAR спектр между 1.25 и 15 ГГц значительно эволюционировал, с признаками разворота из-за быстрого затухания на 1.25 ГГц (Рис. 28). Близкие значения  $\alpha_{143.5}^{1250} \approx +0.8$  обнаруживаются в наблюдениях 1-6. Последующая эволюция спектрального индекса между наблюдениями 1-6 и 8,  $\alpha_{143.5}^{1250} \approx +1$ , была гораздо более выраженной, чем общее увеличение крутизны, которое произошло на более высоких частотах в течение наблюдательной кампании ( $\Delta\alpha_{\text{fitted}} \approx -0.2$ ). Необходимо отметить, что хотя наблюдалось значительное увеличение крутизны  $\alpha_{143.5}^{1250}$  для наблюдения 6 из-за того, что вспышка достигла пика на 1.25 ГГц и начала затухать на 2.3 ГГц,  $\alpha_{143.5}^{1250}$  оставался на уровне предыдущих наблюдений. Ожидалось, что  $\alpha_{143.5}^{1250}$  станет более инвертированным из-за дальнейшей задержки в достижении пика вспышки ниже 1.25 ГГц. Вероятно, на значения  $\alpha_{143.5}^{1250}$  для наблюдений 1-6 повлияла недостаточная точность измерений плотности потока на телескопе LOFAR.

### 3.1.3 Моделирование низкочастотного завала радиоспектра

Важным наблюдением из Рис.28 и Табл.9 является то, что без данных LOFAR вспышка интерпретировалась бы как исключительно оптически тонкая. С включением данных LOFAR стало возможным исследовать механизмы низкочастотного завала в радиоспектре на данном временном интервале. Например, в исследовании Грегори и Сиквиста [228] рассмотрено четыре возможных механизма низкочастотного завала в радиоспектре:

1. Синхротронное самопоглощение:

$$S_\nu = \frac{S_\tau}{1 - \exp(-1)} \left( \frac{\nu}{\nu_\tau} \right)^{2.5} \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\nu}{\nu_\tau} \right)^{\alpha_{\text{fitted}} - 2.5} \right] \right) \quad (9)$$

2. Свободно-свободное поглощение в тепловой плазме, смешанной с синхротронно-излучающей плазмой:

$$S_\nu = \frac{S_\tau}{1 - \exp(-1)} \left( \frac{\nu}{\nu_\tau} \right)^{2.1} \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\nu}{\nu_\tau} \right)^{\alpha_{\text{fitted}} - 2.1} \right] \right) \quad (10)$$

3. Свободно-свободное поглощение на переднем плане:

$$S_\nu = S_\tau \left( \frac{\nu}{\nu_\tau} \right)^{\alpha_{\text{fitted}}} \frac{\exp(-[\nu/\nu_\tau]^{-2.1})}{\exp(-1)} \quad (11)$$

4. Эффект Разина–Цытовича:

$$S_\nu = S_{\text{RT}} \left( \frac{\nu}{\nu_{\text{RT}}} \right)^{\alpha_{\text{fitted}}} \frac{\exp(-\nu_{\text{RT}}/\nu)}{\exp(-1)} \quad (12)$$

В уравнениях 9–12 оптическая глубина  $\tau$  равна единице при частоте  $\nu_\tau$ , где поток равен  $S_\tau$ . В уравнении 12  $\nu_{\text{RT}}$  — частота отсечки для эффекта Разина–Цытовича, ниже которой поток значительно подавляется;  $S_{\text{RT}}$  — поток на этой частоте. Значения  $\alpha_{\text{fitted}}$  приведены в Табл. 9. Частоты  $\nu_\tau$  и  $\nu_{\text{RT}}$  не соответствуют пику модели;  $\nu_p$  — частота пика. Спектральный наклон между 143.5 и 1250 МГц ( $\alpha_{1250}^{143.5} \approx 0.8$  в наблюдениях 1–6) был значительно более инвертирован, чем ожидаемый наклон ( $\alpha = 0.3$ ) для низкочастотного обрыва в спектре энергий электронов, что исключает такой сценарий.

Для данных из Табл. 9 была выполнена аппроксимация моделями из уравнений 9–12. В целом, синхротронное самопоглощение и свободно-свободное поглощение оказались наиболее правдоподобными механизмами поглощения для всех сеансов, кроме 4 и 6, где оптически тонкий спектр на высоких частотах плохо описывался степенным законом. Результаты аппроксимации для эффекта Разина–Цытовича были в основном неудовлетворительными, за исключением наблюдения 8. На Рис. 29 показаны результаты аппроксимации моделей для наблюдений 1 и 8, а в Табл. 10 приведены значения параметров, полученных в результате аппроксимации для этих сеансов.

Необходимо отметить, что результаты могут быть существенно искажены наложением отдельных вспышек, вызванных продолжительной активностью, особенно на частотах LOFAR.

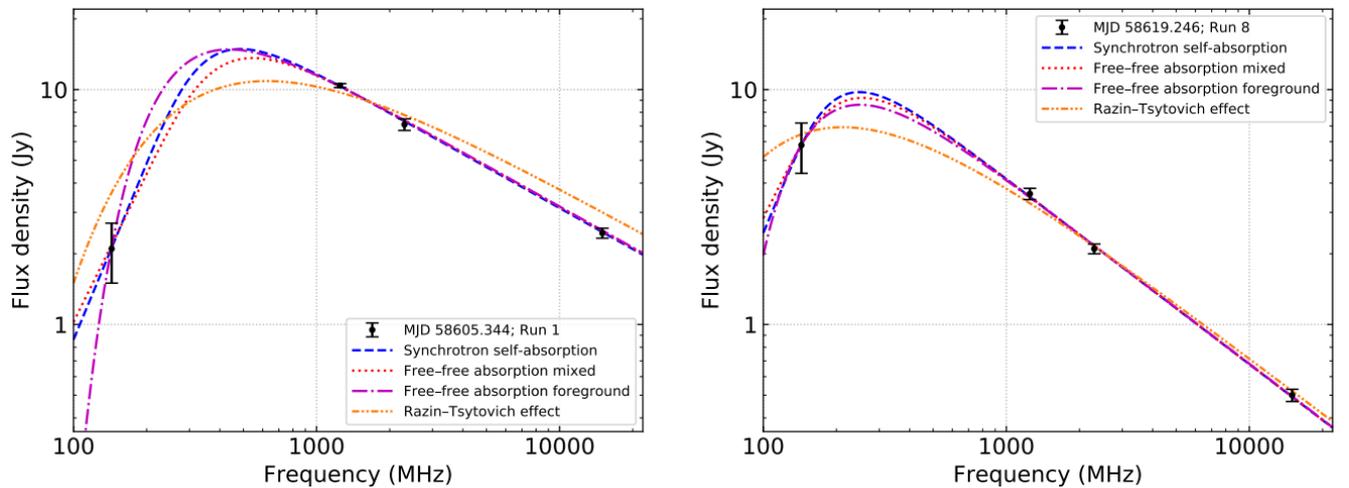


Рисунок 29 — Широкополосные радиоспектры наблюдений 1 и 8 (левая и правая панели соответственно), наложенные на результаты моделирования для механизмов поглощения, описанных в уравнениях 9–12 [222]

Независимо от механизма поглощения, частота пика  $\nu_p$  смещалась к более низким значениям в ходе наблюдательной кампании. Заполнение пробела между частотами LOFAR и RATAN-600, например на 325 и 610 МГц с помощью обновленного GMRT (uGMRT), улучшило бы определение частоты изменения спектра в каждом наблюдении, что потенциально помогло бы идентифицировать наиболее вероятные механизмы поглощения.

### 3.1.4 Сравнение максимума вспышки на частоте 143.5 МГц с предсказаниями модели

Двлее проведено исследование, была ли вспышка на частоте 143.5 МГц ярче или слабее, чем ожидалось на основе измерений более высоких частот (Рис. 30). Предполагается, что фоновым излучением можно пренебречь (см. разделы 1 и 4 в [222]) по сравнению с пиковым потоком вспышки. Аналогично предыдущему анализу, высокочастотная часть радиоспектра ( $16.0 \pm 0.3$ ,  $11.50 \pm 0.58$  и  $4.28 \pm 0.21$  Ян на 1.25, 2.3 и 15 ГГц) была аппроксимирована степенным законом (Рис. 28). Это дало спектральный индекс  $-0.53 \pm 0.02$ , что указывает на оптически тонкий спектр вплоть до 1.25 ГГц.

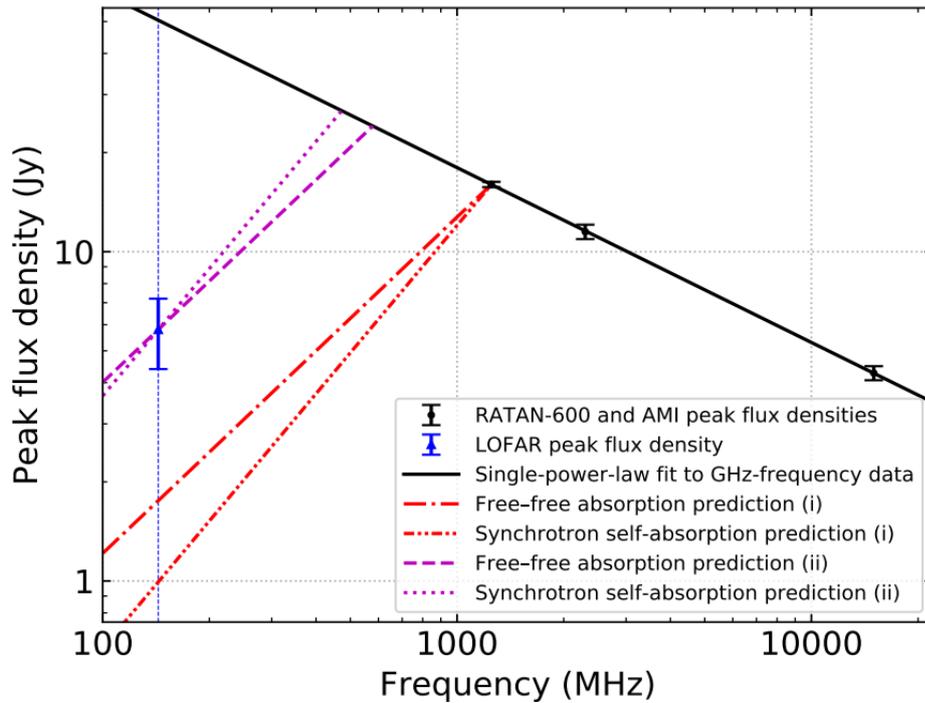


Рисунок 30 — Пиковая плотность потока радиовспышки в мае 2019 года в зависимости от частоты [222]

Пиковая плотность потока, измеренная с помощью LOFAR (Наблюдение 8 в Табл.9), показана треугольником, что является фактически нижним пределом из-за наблюдательных ограничений. Также показаны предсказания модели Марти и др. [229] для случаев свободно-свободного поглощения (1) и синхротронного самопоглощения (2):

1. Спектр меняет наклон сразу ниже 1,25 ГГц.
2. Спектр меняет наклон на более низких частотах таким образом, чтобы предсказания соответствовали измерениям LOFAR.

Черная линия представляет экстраполированную аппроксимацию степенным законом для плотности потока в высокочастотном диапазоне 1-15 ГГц. Вертикальная синяя линия нанесена для указания предсказанных плотностей потока на частоте 143.5 МГц для случая (1). На практике изменение спектра было бы более плавным, чем показано на этом рисунке.

Модель, предложенная Марти и др. [229], описывает вспышки от Cygnus X-3 с помощью противоположно направленных джетов, которые расширяются и в которые постоянно инжектируются релятивистские электроны. Эта модель успешно объяснила свойства вспышки сентября 1972 года в диапазоне частот от 0.4 до 90 ГГц, что немного выше нижней границы диапазона LOFAR.

Необходимо отметить, что результаты модели Марти и др. сильно отличались от часто используемой модели ван дер Лаана [9]. Во вспышке мая 2019 года пиковые плотности потока от Cygnus X-3 не соответствовали модели ван дер Лаана [9]. Во-первых, пиковая плотность потока уменьшалась с увеличением частоты выше 1 ГГц. Во-вторых, пиковая плотность на 143.5 МГц была значительно выше, чем предсказывалось. Аналогично, для объяснения увеличения плотности потока с уменьшением частоты во вспышке 1991 года от GRS 1124-68 была предложена гипотеза о продолжительной эжекции релятивистских электронов [230].

В модели Марти и др. [229] для частот, где излучение изначально оптически тонкое, пиковая плотность потока определяется как:

$$S_{\nu, \max} \propto \nu^{\alpha_{\text{thin}}}, \quad (13)$$

где  $S_{\nu, \max}$  – пиковая плотность потока на частоте  $\nu$ , а  $\alpha_{\text{thin}}$  – спектральный индекс степенного закона в оптически тонком режиме.

Для частот, где излучение изначально оптически толстое:

1. При свободно-свободном поглощении:

$$S_{\nu, \max} \propto \nu^{(6.24 - 5.56\alpha_{\text{thin}})/9} \quad (14)$$

2. При самопоглощении синхротронного излучения:

$$S_{\nu, \max} \propto \nu^{(15 - 26\alpha_{\text{thin}})/(15 - 14\alpha_{\text{thin}})} \quad (15)$$

Предполагая, что вспышка мая 2019 года описывается этой моделью  $\alpha_{\text{thin}} = -0.53$  (что очень близко к  $\alpha_{\text{thin}} = -0.55$ , полученному Марти и др. для вспышки 1972 года), из уравнений следует:

1. Для свободно-свободного поглощения:

$$S_{\nu, \text{max}} \propto \nu^{1.02} \quad (16)$$

2. Для самопоглощения синхротронного излучения:

$$S_{\nu, \text{max}} \propto \nu^{1.28} \quad (17)$$

Если спектр становился оптически толстым сразу ниже 1.25 ГГц, то на частоте 143.5 МГц ожидалось бы пиковые плотности потока примерно 1.8 Ян для свободно-свободного поглощения и 1.0 Ян для синхротронного самопоглощения. Однако измеренная плотность потока  $S_{143.5, \text{max}} \gtrsim 5.8$  Ян ( $\alpha_{143.5}^{1250} \lesssim +0.5$ ) значительно превышает эти значения и указывает на несоответствие с модельными предсказаниями.

Таблица 10 — Частоты завала спектра, аппроксимированные параметры модели и статистика согласия для моделей. Подмножество аппроксимаций (для наблюдений 1 и 8) показано на Рис. 29. Типы аппроксимаций, приведенные ниже, являются сокращенными описаниями механизмов (1)-(4), описанных в уравнениях 9–12 [222]. Пояснение к сокращениям: SSA - синхротронное самопоглощение; FFA mixed - свободно-свободное поглощение смешанное; FFA foreground - свободно-свободное поглощение на переднем плане; RT effect - эффект Разина-Цытовича.

| № наблюдения; тип аппроксимации | $\nu_p$ (МГц) | $\nu_\tau$ или $\nu_{\text{RT}}$ (МГц) | $S_\tau$ или $S_{\text{RT}}$ (Ян) | $\chi_{\text{red}}^2$ |
|---------------------------------|---------------|--|-----------------------------------|-----------------------|
| 1; SSA                          | 490           | $360 \pm 30$                           | $13.6 \pm 0.7$                    | 0.23                  |
| 1; FFA mixed                    | 550           | $410 \pm 40$                           | $12.7 \pm 0.7$                    | 0.47                  |
| 1; FFA foreground               | 440           | $240 \pm 10$                           | $10.3 \pm 0.3$                    | 0.53                  |
| 1; RT effect                    | 630           | $360 \pm 20$                           | $9.8 \pm 0.3$                     | 21                    |
| 8; SSA                          | 250           | $200 \pm 20$                           | $9.3 \pm 0.7$                     | 0.37                  |
| 8; FFA mixed                    | 260           | $210 \pm 20$                           | $8.9 \pm 0.7$                     | 0.38                  |
| 8; FFA foreground               | 250           | $160 \pm 20$                           | $6.7 \pm 0.5$                     | 0.44                  |
| 8; RT effect                    | 210           | $170 \pm 30$                           | $6.8 \pm 0.9$                     | 1.8                   |

Существует по крайней мере два объяснения этого расхождения.

Первое, что частота, при которой спектр переходит от оптически тонкого к толстому режиму, могла быть значительно ниже 1.25 ГГц. Чтобы согласовать измеренную плотность потока на 143.5 МГц с моделью, частота перехода должна быть около 580 МГц для свободно-свободного поглощения и около 470 МГц для самопоглощения. Это означало бы, что на средних частотах пиковые плотности потока могли достигать более 20 Ян. Для сравнения, максимальная

плотность потока на 614 МГц в исследовании [207] была около 7.5 Ян, а в 1972 году на 408 МГц измерена плотность более 7 Ян [231].

Во-вторых, физические процессы могут требовать иного подхода к моделированию, особенно учитывая, что активность вспышки продолжалась более месяца. Это усложняет анализ, так как излучение от нескольких вспышек могло накладываться, особенно на низких частотах с более длительным временем нарастания. Если предположить, что на частоте 143.5 МГц фоновый уровень составлял около 2 Ян до последней яркой вспышки (т.е. оставшееся излучение от предыдущей активности), то эффективная пиковая плотность потока составила бы  $\gtrsim 3.8$ . Это могло бы помочь согласовать наблюдаемую пиковую плотность с предсказаниями модели [229], хотя для точного сравнения необходимо учесть фоновые уровни радиоизлучения и на более высоких частотах. Альтернативным подходом могло бы быть использование модели [232], которая предполагает, что вспышку можно объяснить внутренними ударными волнами в джетах.

На Рис. 27 видно, что вспышка достигла пика на частоте 1.25 ГГц примерно на день позже (MJD 58610), чем на частотах 2.3 и 15 ГГц (MJD 58609). Из-за суточной или более редкой частоты измерений было сложно точно определить задержку выше 1.25 ГГц.

Также трудно с уверенностью оценить задержку между пиком на 2.3/15 ГГц и пиком на 143.5 МГц. Однако, если предположить, что вспышка на 143.5 МГц достигла максимума близко ко времени последнего наблюдения LOFAR, задержка составила бы около десяти дней. Это вполне соответствует предыдущим исследованиям на низких частотах ([200; 204; 207] и расчетам задержек в модели Марти и др.

### 3.1.5 Энергетика вспышки

Используя аналитическую методику, представленную в работе Фендера и Брайта [233], сделаны оценки минимальной энергии, мощности и магнитного поля, необходимых для исследуемой яркой вспышки. Анализ основан на предположении, что эволюция радиовспышки обусловлена изменениями оптической глубины самопоглощения синхротронного излучения. Оценено, что минимальная энергия составляла  $E_{\min} \sim 10^{44}$  эрг, что соответствует минималь-

ной мощности  $P_{\min} \sim 10^{38}$  эрг/с и магнитному полю при  $E_{\min}$  порядка  $B_{\min} \sim 40$  мГс. Также оценено, что скорость расширения вспышки составляла  $\lesssim 0.6$ с, размер  $\lesssim 6 \times 10^{13}$  м, а яркостная температура  $\gtrsim 4 \times 10^{10}$  К.

Из-за низкой частоты наблюдений LOFAR, оценки минимальной энергии и мощности примерно на порядок выше значений, рассчитанных для Cygnus X-3 в работе [233], где сообщалось о наблюдениях вспышек на частотах 2.3 ГГц и 8.3 ГГц в 1994 году. В результате, определенное  $B_{\min}$  также ниже, чем рассчитанное в [233].

Используя время нарастания и максимальную яркость наблюдений LOFAR в качестве альтернативной оценки энергетике джета (см. [234]), получены схожие значения для указанных величин, хотя и несколько меньшие. Эти значения сопоставимы с оценками, полученными тем же методом для радиовспышек от ряда других рентгеновских двойных систем [134].

### 3.1.6 Выводы

В данном разделе представлены и проанализированы наблюдения яркой вспышки микроквазара Cygnus X-3 в апреле–мае 2019 года. Данные РАТАН-600 на частотах 1.25 и 2.3 ГГц сравнивались с одновременными наблюдениями, проведенными с помощью телескопов LOFAR и АМІ на частотах 143.5 МГц и 15 ГГц.

Показано, что начальный уровень плотности потока на 143.5 МГц около  $\sim 2$  Ян с 2 по 7 мая является задержанным и потенциально смешанным низкочастотным излучением от по крайней мере части вспышечной активности, зарегистрированной в высокочастотном диапазоне до начала наблюдательной кампании LOFAR.

Последующее увеличение плотности потока на 143.5 МГц почти в три раза, до измеренного пика в 5.8 Ян 16 мая, интерпретировано как низкочастотный эквивалент яркой вспышки, наблюдавшейся 6/7 мая на РАТАН-600. Предполагается, что пиковая плотность потока на 143.5 МГц была значительно ярче, чем можно было ожидать, исходя из свойств вспышки на высоких частотах. Хотя имеются свидетельства того, что пик на низких частотах был задержан более чем на четыре дня по сравнению с пиками на 2.3 и 15 ГГц 6 мая, кривая блеска является недостаточно детализированной, чтобы с уверенностью опреде-

лить, когда произошел пик на 143.5 МГц. Возможно, что кривая блеска на 143.5 МГц продолжала расти после окончания наблюдений LOFAR, или что вспышка достигла пика между наблюдениями 7 и 8 (т.е. между 10 и 16 мая).

Как и в других исследованиях Cygnus X-3 во время вспышек, обнаружена явная эволюция широкополосного радиоспектра. В частности, наклон спектра ниже 1.25 ГГц значительно уменьшился ( $\alpha_{143.5}^{1250} \approx +1$ ), что подразумевает смещение частоты завала к более низким значениям в ходе наблюдательной кампании LOFAR. Простая интерпретация состоит в том, что по мере развития вспышки она становилась постепенно менее оптически толстой на более низких частотах. Однако из-за недостатка охвата радиоспектра не удалось окончательно определить, было ли самопоглощение синхротронного излучения или свободно-свободное поглощение ответственным за низкочастотный завал.

Оценены физические свойства яркой вспышки: минимальная энергия, магнитное поле и средняя мощность порядка  $10^{44}$  эрг, 40 мГц и  $10^{38}$  эргс<sup>-1</sup> соответственно. Полученные значения согласуются с предыдущими вспышками как Cygnus X-3.

Последующая активность Cygnus X-3 была обнаружена вскоре после совместной кампании, в июне 2019 года [235], включая еще более яркую радиовспышку [217; 235]. Дальнейшие вспышки были обнаружены в феврале и июне 2020 года [236], [237]. Для следующей гигантской вспышки от Cygnus X-3 было бы ценно иметь более частые наблюдения на низких частотах в течение всей продолжительности вспышки.

### 3.2 Результаты мониторинга в периоды ярких вспышек на разных временных масштабах

Первая серия ярких вспышек наблюдалась в апреле и июне 2019 года. Этот период активности Лебедь X-3 включал два вспышечных состояния: в апреле–мае [213] и в июне 2019 года [238]. Для вспышки в апреле 2019 года режим МА наблюдений был применён впервые (Рис. 32). В июне 2019 г. ежедневный мониторинг вспышечной активности Лебедь X-3 показал приближение новой вспышки. В ходе ежедневных наблюдений на частотах 4.7, 8.6 и 16 ГГц продолжительностью 5.5 часов проводились внутрисуточные измерения плотности

яркой вспышки, которая совпала со вспышкой в гамма-диапазоне, зафиксированной космической обсерваторией Fermi/LAT.

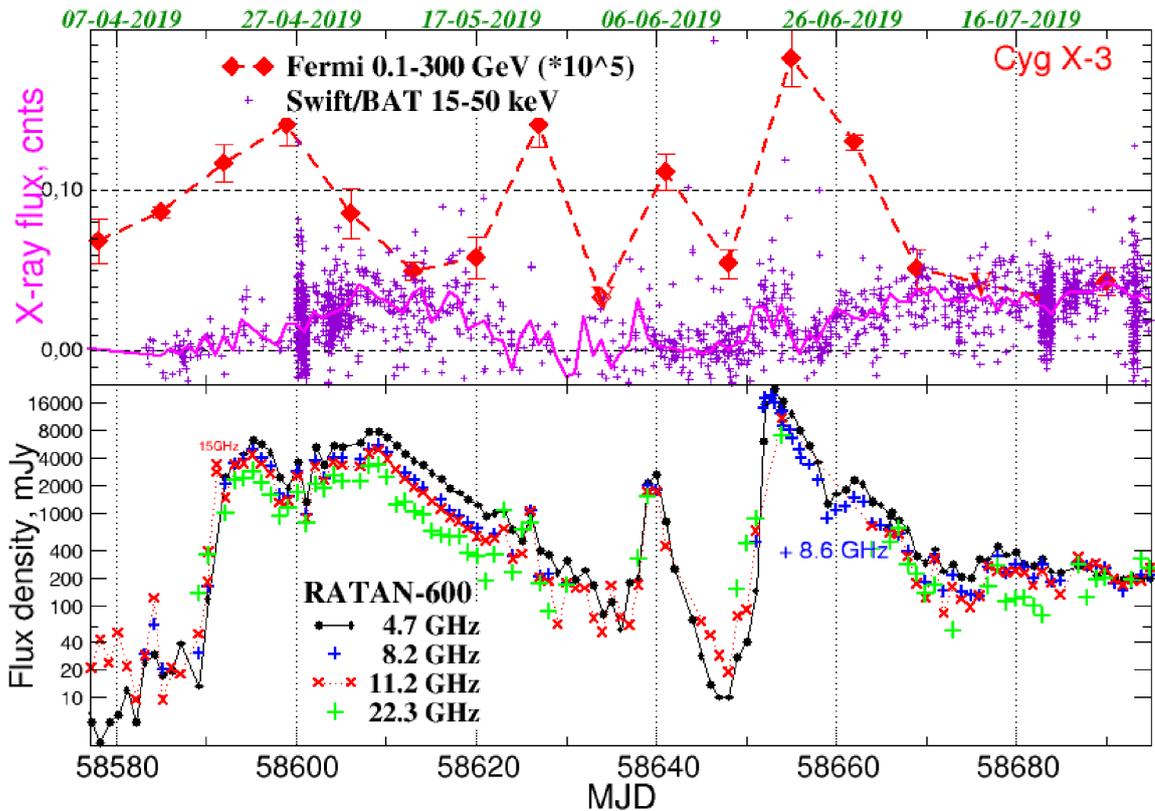


Рисунок 31 — Данные мониторинга РАТАН-600, Swift/BAT, Fermi/LAT в 2019 году

На Рис. 32 справа показаны кривые блеска и изменение спектрального индекса в течение 6 июня 2019 года (MDJ 58640). Видно, что спектр вспышки сначала был ближе к плоскому, но затем становился обычным оптически тонким спектром. Впервые на РАТАН-600 была обнаружена и надёжно измерена быстрая (около 10 минут) переменность радиоизлучения Лебедь X-3.

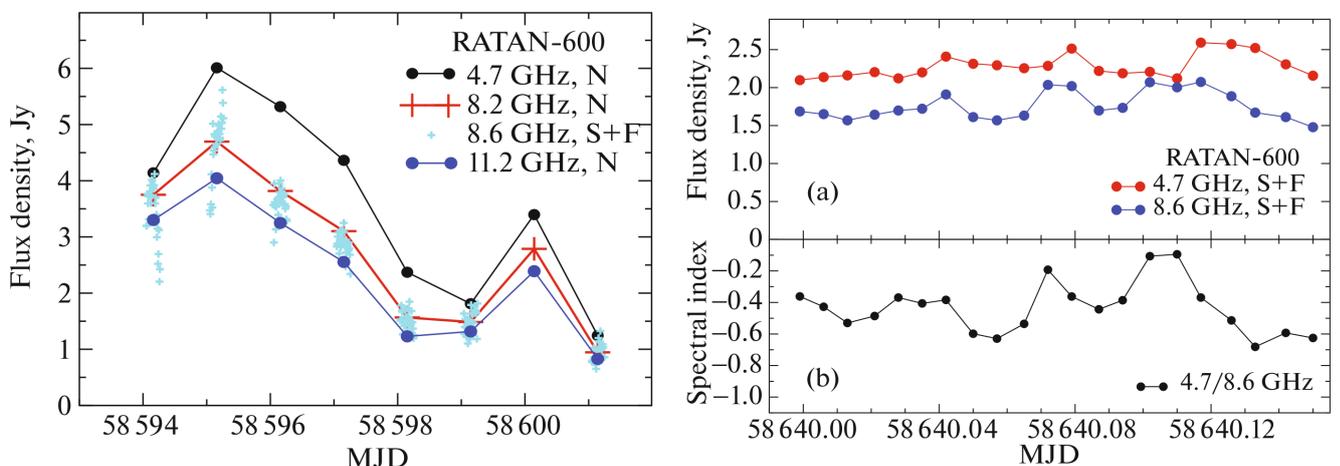


Рисунок 32 — Внутрисуточные измерения вспышек в апреле (слева) и июне (справа) 2019 года

Важным элементом проведенных наблюдений стали измерения потоков Лебедь X-3 на начальной стадии развития гигантской вспышки. Данное событие было зафиксировано 18 июня 2019 года. Наблюдалась стадия постепенного роста потоков источника на всех трех частотах: 4.7, 8.6 и 16 ГГц (Рис. 33).

Рост плотности потока излучения (до момента достижения максимума вспышки) хорошо аппроксимируется простой линейной зависимостью:

$$S_\nu \propto A(t - t_0) \quad (18)$$

где  $t_0$  — время начала вспышки.

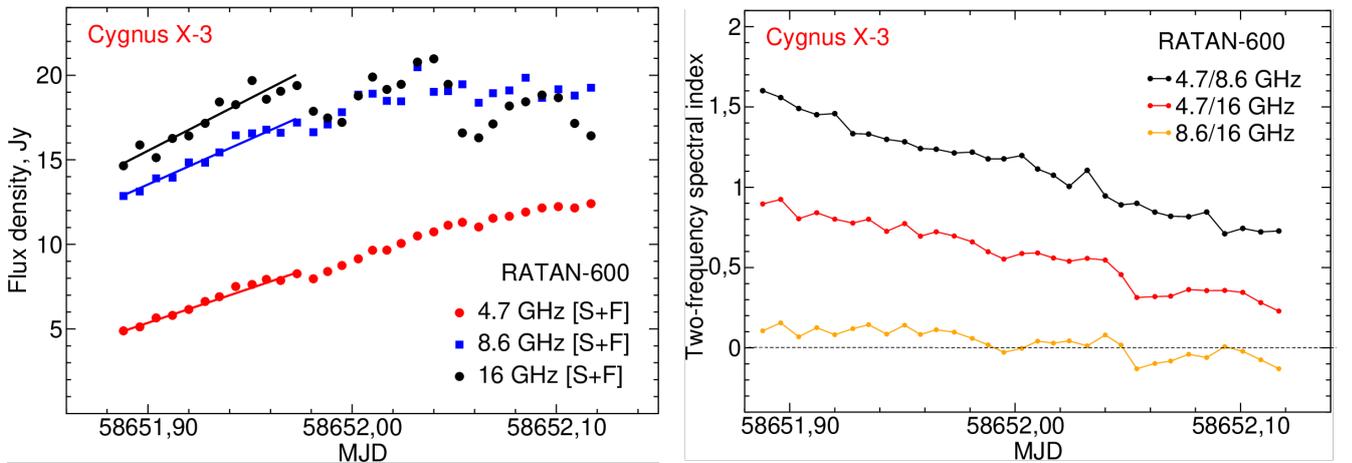


Рисунок 33 — Внутрисуточные кривые блеска (слева) и эволюция спектрального индекса (справа) 18 июня 2019 г.

Из экстраполяции линейной функции были определены моменты начала выброса: 58561.75, 58561.60 и 58561.50 для частот 4.7, 8.6 и 16 ГГц соответственно. Мы выбрали одинаковый интервал аппроксимации по времени для всех частот. Хотя точность такой экстраполяции вряд ли лучше одного часа, стоит отметить заметное смещение моментов начала вспышки от высокой к низкой частоте, что легко находит объяснение в модели подъема СВ из поглощающей оболочки.

По измерениям 18 июня 2019 года спектральный индекс  $\alpha_{4.7/8.6}$  для частот 4.7–8.6 ГГц изменился от +1.6 до +0.7, в то время как спектральный индекс  $\alpha_{8.6/16.0}$  был близок к нулю (Рис. 33).

Можно сделать вывод о том, что происходил переход радиоизлучения от оптически толстого в оптически тонкое состояние, когда уровень максимальной яркости остался позади. Такая эволюция спектра соответствует модели радиоджета, в которой в начале вспышки действует синхротронное самопоглощение, когда сами релятивистские электроны поглощают испущенное ими

излучение. Возможен вариант с поглощением тепловыми электронами, смешанными в струе с релятивистскими. Трудно сделать однозначное разделение механизмов поглощения, не используя сильно разнесенные частоты измерений, как было проанализировано в предыдущем разделе.

Значение спектрального индекса  $\alpha_{4.7/8.6}$ , близкое к +2, указывает на то, что механизм теплового поглощения доминирует на фоне адиабатических энергетических потерь (или даже обратных комптоновских потерь) релятивистскими электронами.

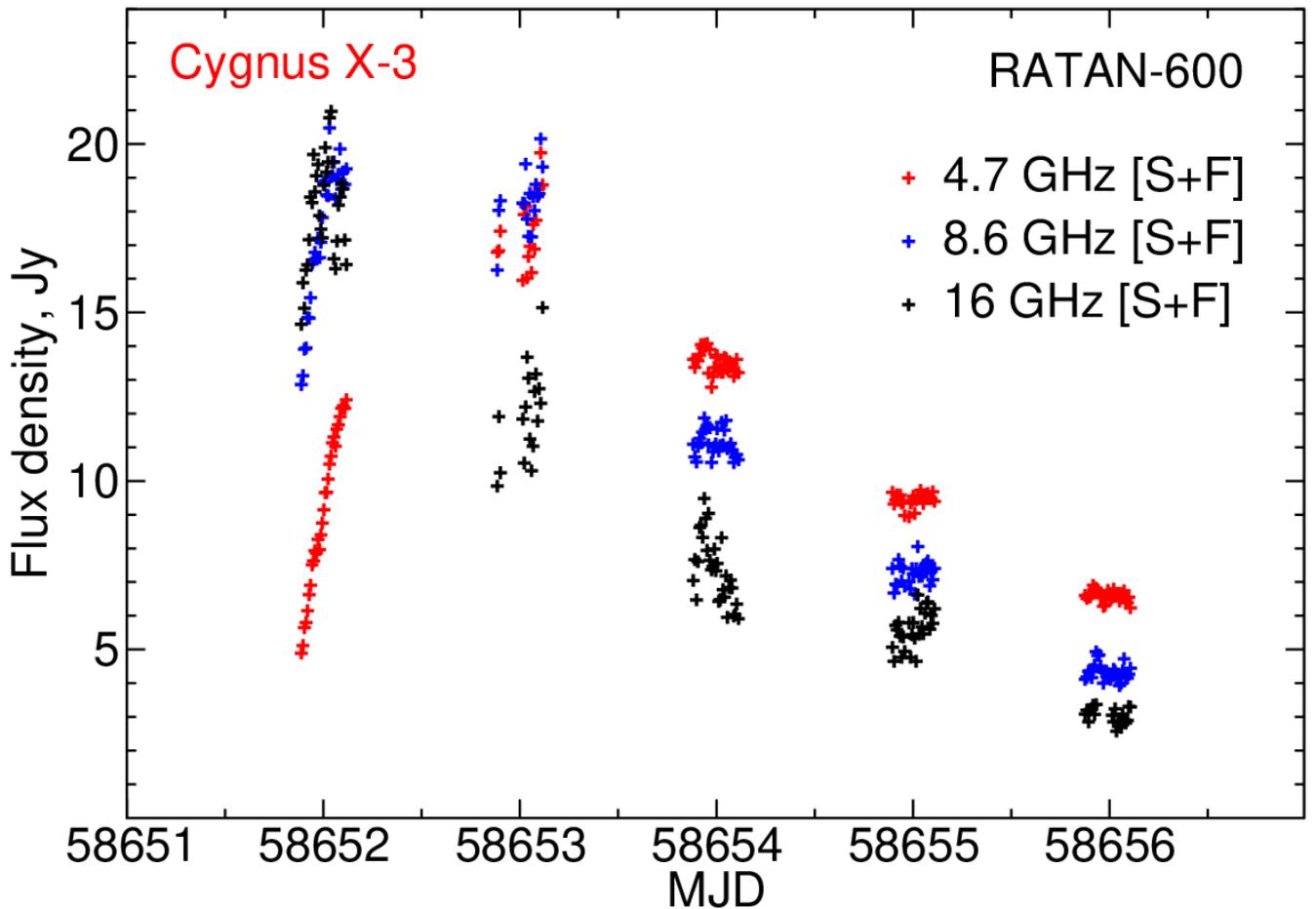


Рисунок 34 — Внутрисуточные кривые блеска Лебедь X-3 на трех частотах с 18 по 22 июня 2019 г.

По данным измерений на 16 января 2020 года (MJD 58864) плотность потока упала до 5 мЯн на частоте 4.7 ГГц, затем в течение следующих 12 дней радиопоток был очень низким, что обычно происходит в период гипермягкого рентгеновского состояния объекта [197]. Первое кратковременное событие произошло MJD 58876, когда потоки выросли до 100 мЯн на частоте 4.7 ГГц. Второе яркое событие с потоком около 1 Ян было зарегистрировано в момент MJD 58881.3, а спектр оставался оптически толстым. 8 февраля 2020 года (MJD

58887.3) началась гигантская вспышка (Рис. 35). На РАТАН-600 вспышка наблюдалась одновременно в двух режимах работы антенны, на Северном секторе, а также на Южном секторе с Плоским отражателем в режиме МА наблюдений. Вспышка также наблюдалась на радиотелескопе АМІ-LA [239; 240].

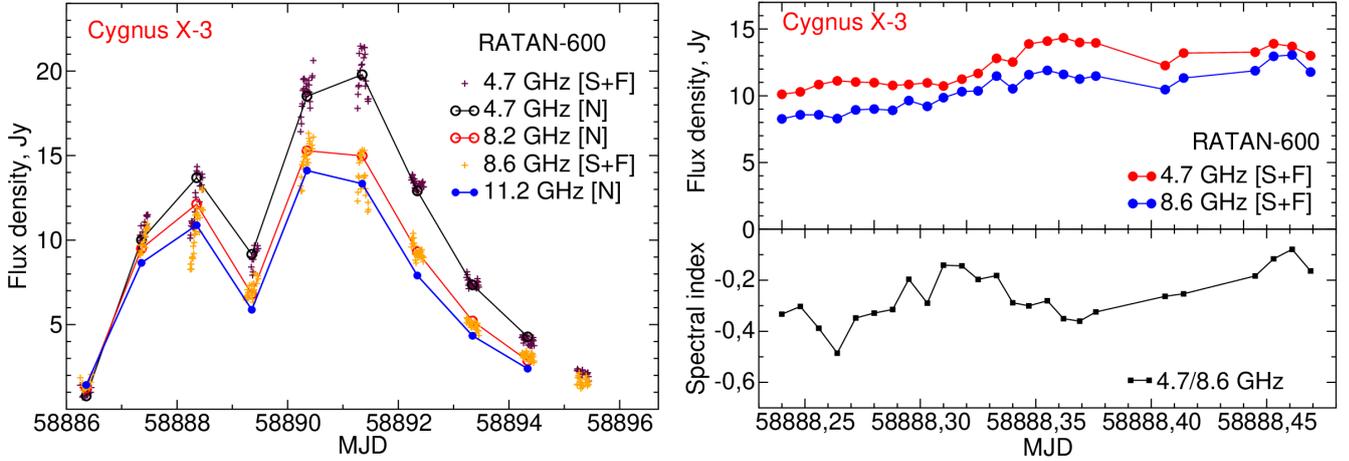


Рисунок 35 — Кривые блеска гигантской вспышки в феврале 2020 г. (слева), внутрисуточные измерения вариаций радиопотока и спектрального индекса (справа).

На Рис. 35 справа показаны кривые блеска и эволюция двухчастотного спектрального индекса в течение MJD 58888. Рост потока этой оптически тонкой вспышки сопровождался характерным для начала вспышки уплощением спектра, то есть спектральный индекс менялся от  $-0.5$  до  $-0.1$ .

Ежедневный многочастотный мониторинг микроквазаров и внутрисуточные измерения в периоды активных состояний Cygnus X-3 способствуют лучшему пониманию связи джета и аккреционного диска в микроквазаре. В моделях синхротронного излучения мы можем оценить размеры и яркостную температуру областей излучения.

31 июля 2021 года во время мониторинга мы вновь обнаружили гигантскую вспышку от микроквазара Лебедь X-3 в диапазоне частот 1.2–30 ГГц. Эта вспышка, вероятно, характеризовалась одиночным выбросом в струе и продолжалась около двух недель.

Как и в большинстве случаев, вспышка сопровождалась заметным ростом  $\gamma$ -излучения, что следует из данных мониторинга объекта на обсерватории Fermi/LAT в диапазоне 0.1–300 ГэВ в течение MJD 59425.0. Событие в гамма-диапазоне зарегистрировано чуть менее чем за сутки до обнаружения нами максимума потока радиоизлучения источника на частоте 4.7 ГГц на MJD 59425.88. По данным Swift/BAT в диапазоне 15–50 кэВ активное рентгеновское состояние продолжалось, и 18 октября 2021 года (MJD 59505) мы обнаружили

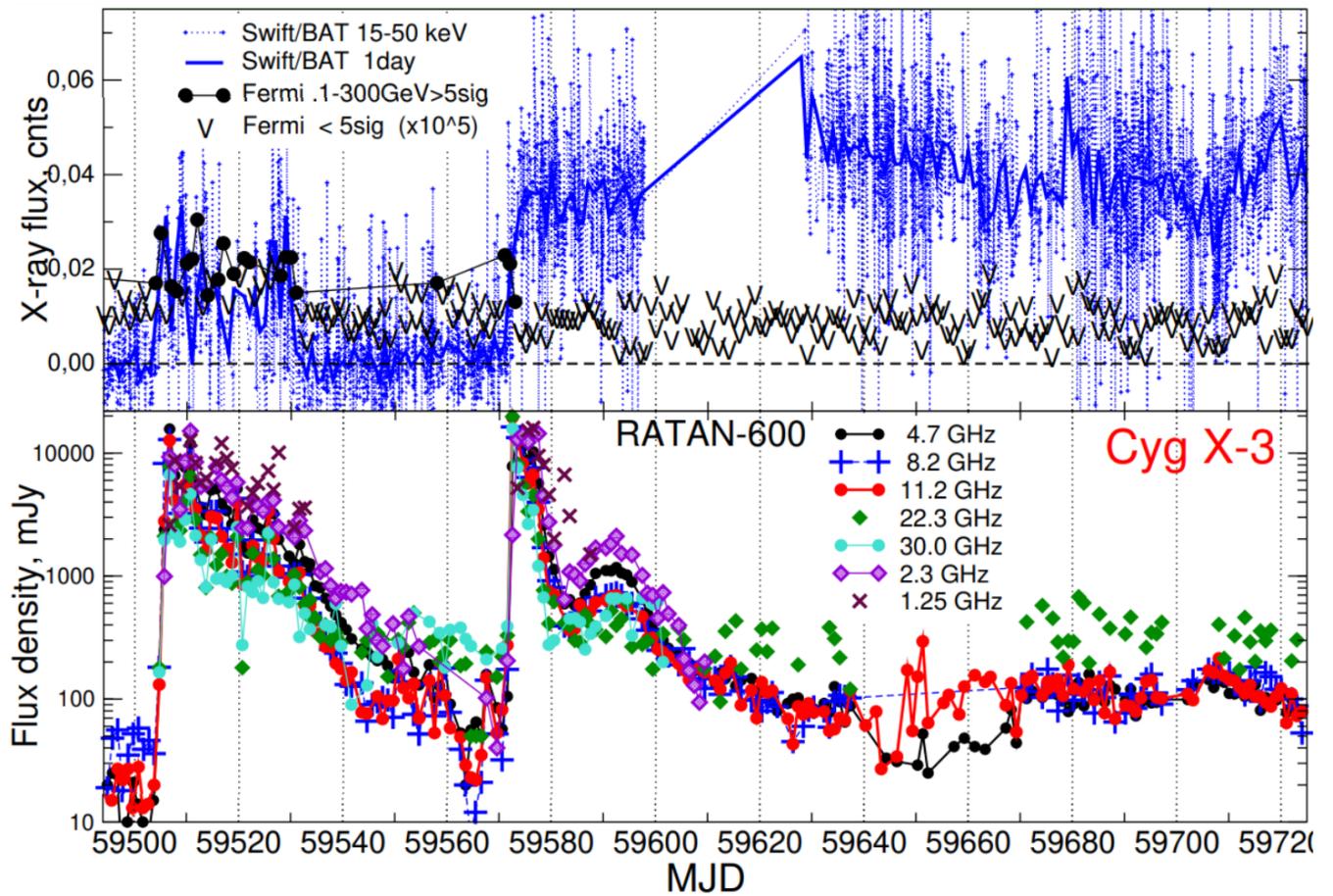


Рисунок 36 — Кривые блеска Лебедь X-3 в октябре–ноябре 2021 года по данным ежедневного мониторинга на Северном секторе телескопа РАТАН-600.

необычную продолжительную гигантскую вспышку, когда поток в максимуме достиг почти 16 Ян на частоте 4.7 ГГц (Рис. 36). Эта вспышка состояла из нескольких последовательных выбросов и закончилась через 45 дней, 2 декабря (MJD 59550). Эта вспышка также сопровождалась активностью в  $\gamma$ -диапазоне по данным обсерватории Fermi и продолжалась до 13 ноября (MJD 59531). 24 декабря 2021 года (MJD 59572.48) мы зарегистрировали еще одну гигантскую вспышку (Рис. 36, 37), которая была довольно предсказуема, так как микроквazar оставался в гипермягком состоянии. Спектр определяется оптически толстыми ( $\alpha = +1.6$ ) и оптически тонкими ( $\alpha = 0$ ) режимами формирующихся струй. Потом вспышка Лебедь X-3 эволюционировала в оптически тонкое состояние с обычным спектральным индексом  $\alpha = -0.55$ . Мы провели четыре серии наблюдений в азимутах и обнаружили лишь незначительную внутрисуточную переменность колебаний на частоте 4.7 ГГц в пределах 10% (Рис. 37).

В середине января 2024 года (по данным монитора Swift/BAT) микроквazar Cygnus X-3 снова перешел в гипермягкое состояние.

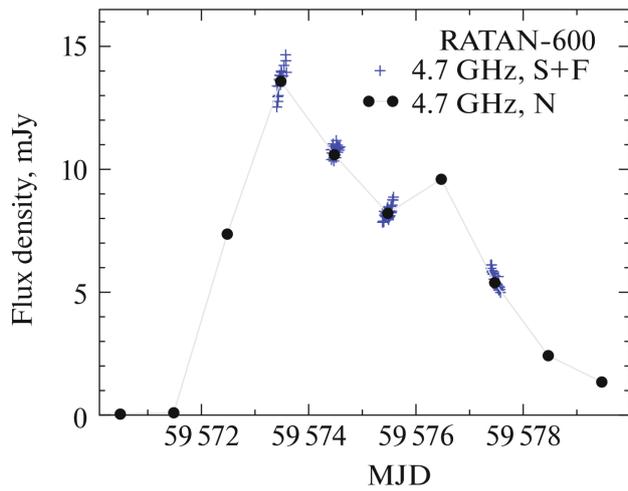


Рисунок 37 — Кривые блеска и эволюция радиоспектра вспышки в декабре 2021 г.

В феврале 2024 года яркие вспышки различной интенсивности наблюдались сразу несколькими радиотелескопами (см. [241], [242], [243]). Как и обычно для гигантских вспышек, вспышка в феврале-марте, характеризовалась единичным выбросом (Рис. 38). Начало вспышки следовало линейному закону, как показали МА измерения. Затем Cygnus X-3 вернулся в погасшее радиосостояние [244].

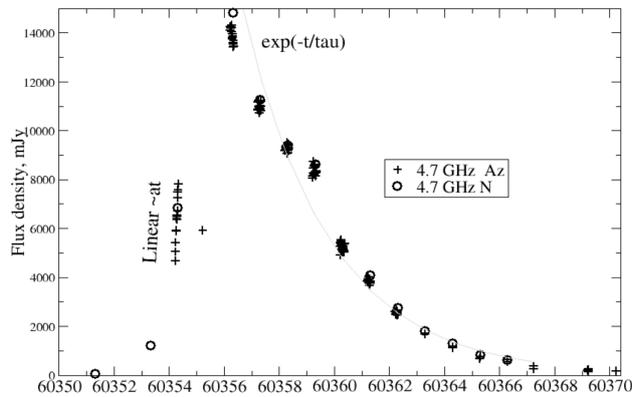


Рисунок 38 — Кривые блеска и радиоспектры с марта по апрель 2024 г.

Новая фаза активности выше 1 Ян была зарегистрирована телескопом РАТАН-600 28 марта 2024 года (Рис. 39). Проведены алертные многочастотные наблюдения с итальянскими радиотелескопами: Medicina (32 м) и Сардинским радиотелескопом (SRT; 64 м) на частотах 4.8 ГГц, 8.3 ГГц и 18.5 ГГц [244].

Вспышка была зарегистрирована 29 марта 2024 года с плотностью потока  $2.8 \pm 0.08$  Ян на частоте 4.8 ГГц,  $2.0 \pm 0.06$  Ян на частоте 8.3 ГГц и  $1.2 \pm 0.1$  Ян на частоте 18.5 ГГц, но на следующий день поток снизился:  $0.58 \pm 0.02$  Ян на 8.5 ГГц и  $0.33 \pm 0.02$  Ян на 18.5 ГГц.

В апреле 2024 года радиопоток снова начал расти. 2 апреля его интенсивность достигла  $9.1 \pm 0.3$  Ян на частоте 4.8 ГГц,  $8.1 \pm 0.4$  Ян на 8.3 ГГц и

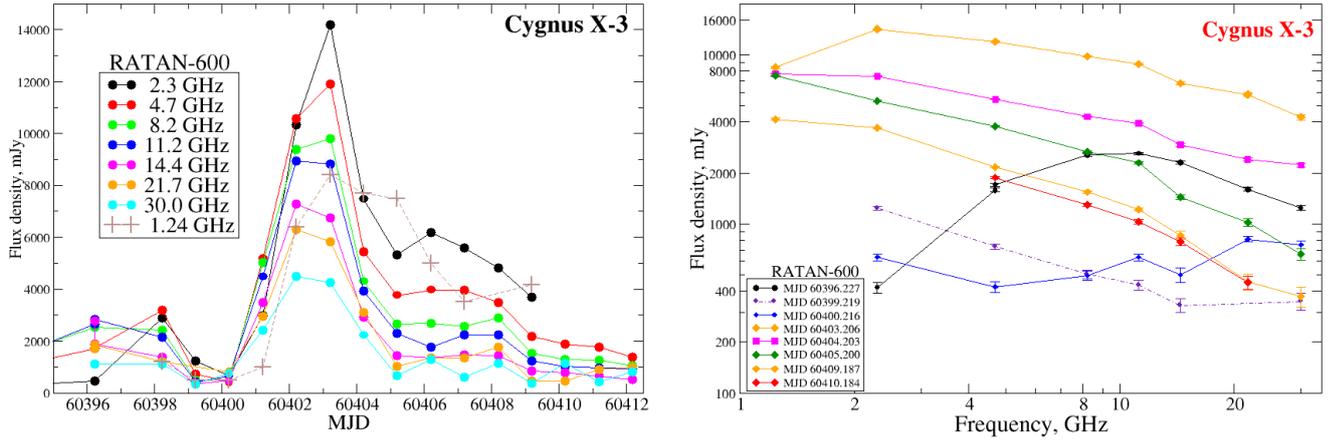


Рисунок 39 — Кривые блеска и радиоспектры с марта по апрель 2024 г.

$5.9 \pm 0.5$  Ян на 18.5 ГГц. Пик наблюдался 3 апреля телескопом РАТАН-600, что указывало на гигантскую вспышку. 5 апреля радиопоток снизился до  $2.3 \pm 0.2$  Ян на частоте 8.3 ГГц.

После долгого периода очень низкого рентгеновского состояния в жестком диапазоне по данным Swift/ВАТ (15-50 кэВ), известного как гипермягкое состояние, 27 марта в рамках долгосрочного многочастотного мониторинга на РАТАН-600 вновь была зафиксирована активность Cygnus X-3 [245]. После 31 марта (MJD 60399.218) мы обнаружили рост гигантской вспышки от объекта, которая достигла максимальной плотности потока около 14 Ян на частоте 2.3 ГГц 3 апреля (MJD 60403.21). Эволюция вспышки развивалась от оптически толстого к оптически тонкому режиму на частотах ниже 2.3 ГГц. На частотах 4.7-11.2 ГГц спектральный индекс радиоизлучения изменился от положительных значений на  $-0.5$ , а затем до  $-0.75$ . Стоит отметить, что 31 марта (MJD 60400.5) телескоп Fermi/LAT зафиксировал самый яркий поток ( $3.79 \times 10^{-6}$  фотонов/см<sup>2</sup>/с) за всю историю наблюдений Cygnus X-3 [245].

Всего за несколько месяцев зафиксирована активность микроквазара Cygnus X-3 в периоды с 13-29 февраля, 27 марта - 1 мая и 25 июня - 16 июля с максимальной плотностью потока 15-20 Ян на частотах 2.3-4.7 ГГц. 24 июля Cygnus X-3 снова вошел в состояние вспышки. 27 июля, поток увеличился до 14 Ян на частоте 4.7 ГГц. Спектры эволюционировали от оптически толстого состояния со спектральным индексом  $\alpha = +1.0$  (24 июля) к почти плоскому спектру с  $\alpha = -0.2$  и  $0.0$  (25 и 26 июля соответственно), а затем к обычному оптически тонкому состоянию с  $\alpha = -0.53$  (27 июля). Таким образом, поток увеличился с 10 мЯн (21 июля) до 14 Ян на частоте 4.7 ГГц (27 июля), то есть почти в 1000 раз [246].

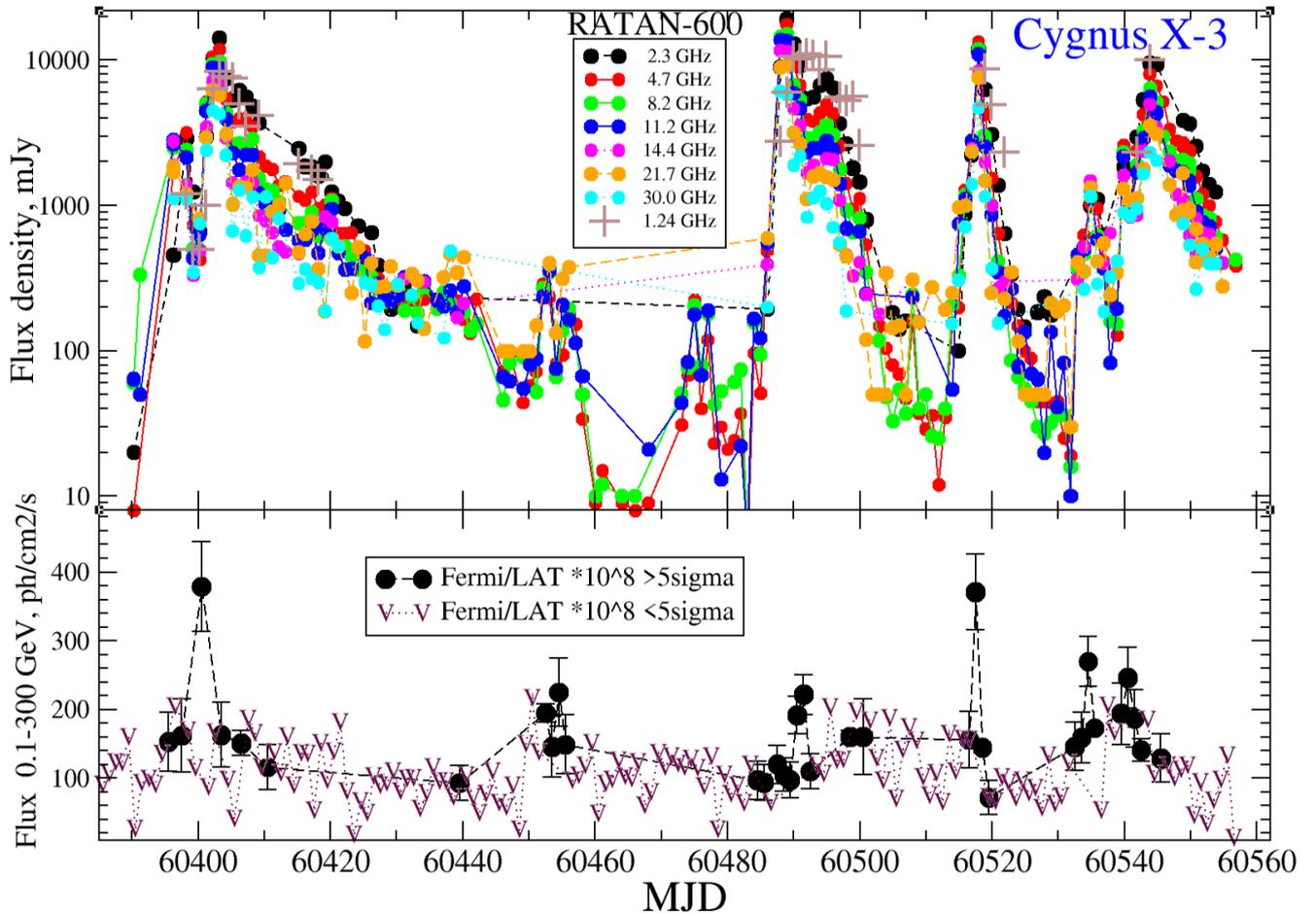


Рисунок 40 — Кривые блеска серии вспышек в радиодиапазоне и в гамма-лучах в 2024 г.

Все четыре гигантские вспышки произошли в течение длительного периода очень низкого рентгеновского состояния в жестком диапазоне 15-50 кэВ, согласно данным Swift/BAT. Поток гамма-излучения в диапазоне 0.1-300 ГэВ был зафиксирован обсерваторией Fermi в течение первых восьми дней последней вспышки.

Как мы установили ранее, гигантские вспышки 2019 года, особенно третья вспышка в июне, вероятно, состояли из двух событий: первое с быстрым увеличением и быстрым снижением, второе — с медленным ростом и медленным спадом. Оба таких события следовали экспоненциальному закону затухания от времени. Эволюция вспышек происходила от оптически плотного к оптически тонкому режиму на частотах ниже 2.3 ГГц [246].

### 3.2.1 Выводы

Радиовспышки являются хорошим индикатором процесса формирования СВ и роста общей активности в микроквазаре Лебедь X-3. Начало вспышки на стадии быстрого роста потока представляет особый интерес, потому что дает представление о том, как генерируются электроны, ответственные за синхротронное радиоизлучение. В гигантской вспышке 18 июня 2019 года мы убедительно показали, что потоки вспышек на частотах 4.7, 8.6 и 16 ГГц росли линейно до момента достижения локального максимума потока, а также с небольшой задержкой на более низких частотах.

Следует отметить, что быстрая эволюция оптически толстого радиоизлучения накладывает существенные ограничения на геометрию струй. Действительно, после начала вспышки объемные сгустки внутри струй должны расширяться, как правило, в трех измерениях, согласно классической модели [9]. Но для струй с конической геометрией такое расширение может быть экспоненциальным [229], когда довольно тонкие оболочки ударных волн в струях могут приводить к одномерному или двумерному расширению.

Многочастотные спектры указывали на оптически толстое излучение, вероятно, связанное с внутренним поглощением тепловыми электронами или с синхротронным самопоглощением, согласно [233]. Плавная внутрисуточная переменность радиопотоков была обнаружена и на стадии затухания вспышек.

## Заключение

С 1979 года на радиотелескопе РАТАН-600 проводятся систематические исследования микроквара SS 433 и других подобных РДС. Выяснилось, что их переменное радиоизлучение является индикатором активности вблизи центральных областей вокруг ЧД, которые служат основными источниками энергии при аккреции на них вещества с оптической звезды. Формирование горячего аккреционного диска и интенсивного звёздного ветра приводит к стационарному истечению вещества в виде двух противоположно направленных струй, скорости которых могут варьироваться от 10% до 98% скорости света. В результате генерации ударных волн с магнитным полем внутри джета происходит ускорение релятивистских электронов, которые производят синхротронное радиоизлучение.

В 2018 году в микрокваре SS433 были зарегистрированы несколько ярких радиовспышек, которые однозначно проявились в оптическом и рентгеновском диапазонах. Эти совместные измерения ясно показали существование тесной причинно-следственной связи между возникновением радиовспышек в активных состояниях микрокваров и вариациями темпа переноса и инъекции вещества в системе. В августе того же года была зафиксирована самая яркая оптически тонкая вспышка с потоком 6 Ян на частоте 2.3 ГГц.

На телескопе РАТАН-600 был реализован новый метод многоазимутальных наблюдений на антенной системе «Южный сектор с Плоским отражателем», а в фокусе вторичного зеркала №3 были установлены высокочувствительные модульные радиометры на частотах 4.7 и 8.2 ГГц. В результате этих измерений на РАТАН-600 были получены уникальные данные по внутрисуточной переменности микрокваров на временах от 5 минут до 6 часов. Впервые стало ясно, что на начальной стадии развития многих вспышек поток нарастает по линейному закону, что подразумевает особую геометрию, при которой объём синхротронно излучающих областей, движущихся от компактного объекта, расширяется только в одном направлении. 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.

Проведены совместные наблюдения с низкочастотным телескопом LOFAR. По результатам анализа эволюции кривых блеска и радиоспектра сделан вывод о свойствах радиоизлучающей области в струйных выбросах Cygnus X-3 во время яркой вспышки. Оценены минимальная энергия —  $10^{44}$  эрг, магнитное поле — 40 мГс и средняя радиосветимость источника —  $10^{38}$  эрг/с.

В результате долговременного мониторинга GRS 1915+105 зарегистрированы многочисленные вспышки, корреляция которых с рентгеновскими событиями (состояниями) была выявлена с высокой надёжностью. Особенно интересна вспышка микроквазара летом 2023 года, когда максимум потока достиг  $\sim 6$  Ян на 2.3 ГГц впервые за всю историю исследований источника. Во внутрисуточных кривых блеска этой ярчайшей вспышки впервые удалось обнаружить квазипериодические осцилляции радиопотока на временах около 30 минут.

В исследовании уникальной рентгеновской двойной системы L SI+61°303, единственным известным периодически вспыхивающим радиоисточником в Млечном пути, источником гамма-лучей и эмиссионной звезды в измеренных кривых блеска за  $\sim 10$  лет наблюдений, с помощью периодограммного анализа Скаргла-Ломба, обнаружены две значимые гармоники, соответствующие периодам 26.49 и 26.93 дня, что указывает на прецессию струйных выбросов со вторым периодом, близким к орбитальному периоду. А сверхорбитальный период 4.6 года в системе объясняется биением двух найденных близких гармоник.

Таким образом, проведённые исследования существенно расширяют наше понимание процессов, происходящих в микроквазарах, и вносят значимый вклад в астрофизику релятивистских объектов.

## Благодарности

Автор выражает особую благодарность своему научному руководителю Трушкину С. А., под руководством которого проведено данное диссертационное исследование. Благодаря коллегам из лаборатории радиометров континуума Цыбулёву П.Г., Нижельскому Н.А., Борису А.Н., а также Бурсову Н.Н., и операторам приёмных кабин телескопа РАТАН-600, был успешно реализован метод многоазимутальных наблюдений.

Без поддержки Валявина Г.Г., Власюка В.В., Кайсиной Е.И. и Сотниковой Ю.В. представленная работа не была бы закончена.

## 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](https://arxiv.org/abs/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](https://arxiv.org/abs/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](https://arxiv.org/abs/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. — НОЯБ. — Т. 345, № 4. — С. 1057—1076. — arXiv: [astro-ph/0305261](https://arxiv.org/abs/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](https://arxiv.org/abs/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](#) [[astro-ph](#)].
12. *van der Klis, M.* Rapid X-ray Variability / M. van der Klis // *Compact stellar X-ray sources*. Т. 39 / под ред. W. H. G. Lewin, M. van der Klis. — 2006. — С. 39–112.
13. *Remillard, R. A.* X-Ray Properties of Black-Hole Binaries / R. A. Remillard, J. E. McClintock // *Annual Review of Astron and Astrophys.* — 2006. — Сент. — Т. 44, № 1. — С. 49–92. — arXiv: [astro-ph/0606352](#) [[astro-ph](#)].
14. *Fender, R. P.* Towards a unified model for black hole X-ray binary jets / R. P. Fender, T. M. Belloni, E. Gallo // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Дек. — Т. 355, № 4. — С. 1105–1118. — arXiv: [astro-ph/0409360](#) [[astro-ph](#)].
15. *Bell, A. R.* The acceleration of cosmic rays in shock fronts - I. / A. R. Bell // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1978. — Янв. — Т. 182. — С. 147–156.
16. *Sironi, L.* Relativistic Shocks: Particle Acceleration and Magnetization / L. Sironi, U. Keshet, M. Lemoine // *Space Science Reviews*. — 2015. — Окт. — Т. 191, № 1–4. — С. 519–544. — arXiv: [1506.02034](#) [[astro-ph.HE](#)].
17. Modulated High-Energy Gamma-Ray Emission from the Microquasar Cygnus X-3 / Fermi LAT Collaboration [и др.] // *Science*. — 2009. — Дек. — Т. 326, № 5959. — С. 1512.
18. Microquasar Cyg X-3 - a unique jet-wind neutrino factory? / K. I. I. Koljonen [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2023. — Сент. — Т. 524, № 1. — С. L89–L93. — arXiv: [2306.11804](#) [[astro-ph.HE](#)].
19. Extreme particle acceleration in the microquasar CygnusX-3 / M. Tavani [и др.] // *Nature*. — 2009. — Дек. — Т. 462, № 7273. — С. 620–623. — arXiv: [0910.5344](#) [[astro-ph.HE](#)].
20. Gamma rays detected from Cygnus X-1 with likely jet origin / R. Zanin [и др.] // *A&A*. — 2016. — Ноябрь. — Т. 596. — A55. — arXiv: [1605.05914](#) [[astro-ph.HE](#)].

21. *Bosch-Ramon, V.* Understanding the Very-High Emission from Microquasars / V. Bosch-Ramon, D. Khangulyan // International Journal of Modern Physics D. — 2009. — ЯНВ. — Т. 18, № 3. — С. 347–387. — arXiv: [0805.4123 \[astro-ph\]](#).
22. The X-ray Jets of SS 433 in the Period of Flaring Activity in the Summer of 2018 / P. S. Medvedev [и др.] // Astronomy Letters. — 2022. — Июль. — Т. 48, № 7. — С. 389–405.
23. As Above, So Below: Exploiting Mass Scaling in Black Hole Accretion to Break Degeneracies in Spectral Interpretation / S. Markoff [и др.] // ApJL. — 2015. — ОКТ. — Т. 812, № 2. — С. L25. — arXiv: [1510.02244 \[astro-ph.HE\]](#).
24. *McKinney, J. C.* General relativistic magnetohydrodynamic simulations of magnetically choked accretion flows around black holes / J. C. McKinney, A. Tchekhovskoy, R. D. Blandford // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Июль. — Т. 423, № 4. — С. 3083–3117. — arXiv: [1201.4163 \[astro-ph.HE\]](#).
25. *Malzac, J.* The spectral energy distribution of compact jets powered by internal shocks / J. Malzac // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — СЕНТ. — Т. 443, № 1. — С. 299–317. — arXiv: [1406.2208 \[astro-ph.HE\]](#).
26. Accretion instabilities and jet formation in GRS 1915+105 / I. F. Mirabel [и др.] // A&A. — 1998. — ФЕВР. — Т. 330. — С. L9–L12. — arXiv: [astro-ph/9711097 \[astro-ph\]](#).
27. *Rees, M. J.* Astrophysical Evidence for Black Holes / M. J. Rees // Black Holes and Relativistic Stars / под ред. R. M. Wald. — 01.1998. — С. 79. — arXiv: [astro-ph/9701161 \[astro-ph\]](#).
28. *Rees, M. J.* Black Hole Models for Active Galactic Nuclei / M. J. Rees // Annual Review of Astron and Astrophys. — 1984. — ЯНВ. — Т. 22. — С. 471–506.
29. *Hynes, R. I.* Multiwavelength Observations of Accretion in Low-Mass X-ray Binary Systems / R. I. Hynes // arXiv e-prints. — 2010. — ОКТ. — arXiv:1010.5770. — arXiv: [1010.5770 \[astro-ph.HE\]](#).
30. *Coppi, P. S.* The Physics of Hybrid Thermal/Non-Thermal Plasmas / P. S. Coppi // High Energy Processes in Accreting Black Holes. Т. 161 / под ред. J. Poutanen, R. Svensson. — 01.1999. — С. 375. — (Astronomical

- Society of the Pacific Conference Series). — arXiv: [astro-ph/9903158](#) [[astro-ph](#)].
31. *Blandford, R. D.* Accretion disc electrodynamics - a model for double radio sources. / R. D. Blandford // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1976. — Сент. — Т. 176. — С. 465—481.
  32. *Blandford, R. D.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. / R. D. Blandford, R. L. Znajek // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1977. — Май. — Т. 179. — С. 433—456.
  33. *Blandford, R. D.* Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. / R. D. Blandford, D. G. Payne // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1982. — Июнь. — Т. 199. — С. 883—903.
  34. *Uchida, Y.* Magnetodynamical acceleration of CO and optical bipolar flows from the region of star formation. / Y. Uchida, K. Shibata //. — 1985. — ЯНВ. — Т. 37. — С. 515—535.
  35. *Uchida, Y.* Magnetodynamical acceleration of cosmic jets: sweeping-magnetic-twistmechanism. / Y. Uchida, K. Shibata // Canadian Journal of Physics. — 1986. — Апр. — Т. 64. — С. 507—513.
  36. *Meier, D.* On the Anticorrelation between High Accretion Luminosity and Radio Jet Ejection in GRO J1655-40 and Other Objects / D. Meier // ApJ. — 1996. — Март. — Т. 459. — С. 185.
  37. *Meier, D. L.* Magnetohydrodynamic Production of Relativistic Jets / D. L. Meier, S. Koide, Y. Uchida // Science. — 2001. — ЯНВ. — Т. 291, № 5501. — С. 84—92.
  38. *Russell, D. M.* Powerful jets from accreting black holes: evidence from the optical and infrared / D. M. Russell, R. P. Fender // arXiv e-prints. — 2010. — ЯНВ. — arXiv:1001.1244. — arXiv: [1001.1244](#) [[astro-ph.HE](#)].
  39. *Jamil, O.* iShocks: X-ray binary jets with an internal shocks model / O. Jamil, R. P. Fender, C. R. Kaiser // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — ЯНВ. — Т. 401, № 1. — С. 394—404.
  40. *Kaiser, C. R.* Internal shock model for microquasars / C. R. Kaiser, R. Sunyaev, H. C. Spruit // A&A. — 2000. — Апр. — Т. 356. — С. 975—988. — arXiv: [astro-ph/0001501](#) [[astro-ph](#)].

41. *Maccarone, T. J.* Do X-ray binary spectral state transition luminosities vary? / T. J. Maccarone // *A&A.* — 2003. — Окт. — Т. 409. — С. 697—706. — arXiv: [astro-ph/0308036](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0308036) [[astro-ph](#)].
42. *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](#)].
43. 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](#)].
44. 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.
45. *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).
46. *Tsybulev, P. G.* New-generation data acquisition and control system for continuum radio-astronomic observations with RATAN-600 radio telescope: Development, observations, and measurements / P. G. Tsybulev // *Astrophysical Bulletin.* — 2011. — Янв. — Т. 66, № 1. — С. 109—122.
47. An updated list of radio flux density calibrators. / M. Ott [и др.] // *A&A.* — 1994. — Апр. — Т. 284. — С. 331—339.
48. The absolute spectrum of Cas A: an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators. / J. W. M. Baars [и др.] // *A&A.* — 1977. — Окт. — Т. 61. — С. 99—106.
49. Radioteleskop RATAN-600 / S. E. Khaikin [и др.] // *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove.* — 1972. — Янв. — Т. 188. — С. 3—12.
50. *Parijskij, Y. N.* RATAN-600 - The world's biggest reflector at the 'cross roads' / Y. N. Parijskij // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* — 1993. — Авг. — Т. 35, № 4. — С. 7—12.

51. *Korolkov, D. V.* The Soviet RATAN-600 Radio Telescope / D. V. Korolkov, I. N. Pariiskii // — 1979. — Апр. — Т. 57. — С. 324.
52. Determination of the flux densities of radio sources on the set of broadband continuous-spectrum radiometers for the RATAN-600 radio telescope. / K. D. Aliakberov [и др.] // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 1985. — ЯНВ. — Т. 19. — С. 59—65.
53. C-Band Radiometer for Continuum Observations at RATAN-600 Radio Telescope / P. G. Tsybulev [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2018. — Окт. — Т. 73, № 4. — С. 494—500.
54. Радиометры континуума радиотелескопа РАТАН-600 / П. Г. Цыбулёв [и др.] // Известия Крымской астрофизической обсерватории. — 2023. — ноя. — Т. 119, № 3. — С. 26—30. — URL: <https://jncrao.ru/index.php/izvcrao/article/view/1135>.
55. *Pariiskii, I. N.* Metody radioastronomicheskogo ispolzovaniia RATAN-600 / I. N. Pariiskii, O. N. Shivris // Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoi Observatorii v Pulkove. — 1972. — ЯНВ. — Т. 188. — С. 13—39.
56. Development of ephemeris support in observations of distant radio sources and solar system objects at RATAN-600 radio telescope / A. N. Korzhavin [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2012. — Апр. — Т. 67, № 2. — С. 225—229.
57. *Verkhodanov, O. V.* Multiwave Continuum Data Reduction at RATAN-600 / O. V. Verkhodanov // ADAS. — 1997. — ЯНВ. — Т. 125. — С. 46.
58. *Zijlstra, A. A.* The Evolution of NGC 7027 at Radio Frequencies: A New Determination of the Distance and Core Mass / A. A. Zijlstra, P. A. M. van Hoof, R. A. Perley // ApJ. — 2008. — ИЮЛЬ. — Т. 681, № 2. — С. 1296—1309. — arXiv: [0801.3327](https://arxiv.org/abs/0801.3327) [astro-ph].
59. *Lomb, N. R.* Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data / N. R. Lomb // Astrophysics and Space Science. — 1976. — Февр. — Т. 39, № 2. — С. 447—462.
60. *Scargle, J. D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. / J. D. Scargle // ApJ. — 1982. — Дек. — Т. 263. — С. 835—853.

61. *Fabrika, S.* The jets and supercritical accretion disk in SS433 / S. Fabrika // — 2004. — ЯНВ. — Т. 12. — С. 1—152. — arXiv: [astro-ph/0603390](#) [[astro-ph](#)].
62. A High-Resolution Radio Study of the W50-SS 433 System and the Surrounding Medium / G. M. Dubner [и др.] // *Astronomical Journal*. — 1998. — ОКТ. — Т. 116, № 4. — С. 1842—1855.
63. *Goodall, P. T.* When microquasar jets and supernova collide: hydrodynamically simulating the SS 433-W 50 interaction / P. T. Goodall, F. Alouani-Bibi, K. M. Blundell // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — ИЮЛЬ. — Т. 414, № 4. — С. 2838—2859. — arXiv: [1101.3486](#) [[astro-ph.SR](#)].
64. Optical Monitoring of SS 433 in 2017-2021 / A. M. Cherepashchuk [и др.] // *Astronomy Reports*. — 2022. — ИЮНЬ. — Т. 66, № 6. — С. 451—465.
65. *Gies, D. R.* The Spectrum of the Mass Donor Star in SS 433 / D. R. Gies, W. Huang, M. V. McSwain // *ApJL*. — 2002. — ОКТ. — Т. 578, № 1. — С. L67—L70. — arXiv: [astro-ph/0208044](#) [[astro-ph](#)].
66. Identification of the Mass Donor Star's Spectrum in SS 433 / T. C. Hillwig [и др.] // *ApJ*. — 2004. — НОЯБ. — Т. 615, № 1. — С. 422—431. — arXiv: [astro-ph/0403634](#) [[astro-ph](#)].
67. Subaru And Gemini Observations Of SS 433: New Constraint On The Mass Of The Compact Object / K. Kubota [и др.] // *ApJ*. — 2010. — ФЕВР. — Т. 709, № 2. — С. 1374—1386. — arXiv: [0912.2797](#) [[astro-ph.SR](#)].
68. *Goranskij, V.* Photometric Mass Estimate for the Compact Component of SS 433: And Yet It Is a Neutron Star / V. Goranskij // *Peremennye Zvezdy*. — 2011. — ОКТ. — Т. 31, № 5. — С. 5. — arXiv: [1110.5304](#) [[astro-ph.HE](#)].
69. *Blundell, K. M.* Symmetry in the Changing Jets of SS 433 and Its True Distance from Us / K. M. Blundell, M. G. Bowler // *ApJL*. — 2004. — ДЕК. — Т. 616, № 2. — С. L159—L162. — arXiv: [astro-ph/0410456](#) [[astro-ph](#)].
70. *Crampton, D.* The probable binary nature of SS 433. / D. Crampton, A. P. Cowley, J. B. Hutchings // *ApJL*. — 1980. — ФЕВР. — Т. 235. — С. L131—L135.
71. *Cherepashchuk, A.* Observational Manifestations of Precession of Accretion Disk in the SS 433 Binary System / A. Cherepashchuk // *Space Science Reviews*. — 2002. — ОКТ. — Т. 102, № 1. — С. 23—35.

72. Twenty Years of Timing SS 433 / S. S. Eikenberry [и др.] // *ApJ*. — 2001. — Ноябрь. — Т. 561, № 2. — С. 1027—1033. — arXiv: [astro-ph/0107296](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0107296) [[astro-ph](#)].
73. *Abell, G. O.* A kinematic model for SS433 / G. O. Abell, B. Margon // *Nature*. — 1979. — ИЮНЬ. — Т. 279, № 5715. — С. 701—703.
74. *Margon, B.* Observations of SS 433 / B. Margon // *Annual Review of Astron and Astrophys.* — 1984. — ЯНВ. — Т. 22. — С. 507—536.
75. Nodding motions of accretion rings and disks : a short-term period in SS 433. / J. I. Katz [и др.] // *ApJ*. — 1982. — СЕНТ. — Т. 260. — С. 780—793.
76. *Trushkin, S. A.* A giant radio flare from SS433 / S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, P. G. Tsybulev // *The Astronomer's Telegram*. — 2012. — ОКТ. — Т. 4484. — С. 1.
77. *Marshall, H. L.* The High-Resolution X-Ray Spectrum of SS 433 Using the Chandra HETGS / H. L. Marshall, C. R. Canizares, N. S. Schulz // *ApJ*. — 2002. — ЯНВ. — Т. 564, № 2. — С. 941—952. — arXiv: [astro-ph/0108206](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0108206) [[astro-ph](#)].
78. INTEGRAL observations of SS433: Results of a coordinated campaign / A. M. Cherepashchuk [и др.] // *A&A*. — 2005. — ИЮЛЬ. — Т. 437, № 2. — С. 561—573. — arXiv: [astro-ph/0503352](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503352) [[astro-ph](#)].
79. A Massive Jet Ejection Event from the Microquasar SS 433 Accompanying Rapid X-Ray Variability / T. Kotani [и др.] // *ApJ*. — 2006. — ЯНВ. — Т. 637, № 1. — С. 486—493. — arXiv: [astro-ph/0509411](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0509411) [[astro-ph](#)].
80. *Goranskii, V. P.* Optical variability of SS 433 in 1978-1996 / V. P. Goranskii, V. F. Esipov, A. M. Cherepashchuk // *Astronomy Reports*. — 1998. — Март. — Т. 42, № 2. — С. 209—228.
81. *Fabrika, S. N.* The mass function of SS 433. / S. N. Fabrika, L. V. Bychkova // *A&A*. — 1990. — Дек. — Т. 240. — С. L5.
82. A series of VLBI images of SS 433 during the outbursts. / R. C. Vermeulen [и др.] // *A&A*. — 1993. — Март. — Т. 270. — С. 177—188.
83. Daily spectra of radio flares from SS 433 in may/june 1987. / R. C. Vermeulen [и др.] // *A&A*. — 1993. — Март. — Т. 270. — С. 189—199.

84. *Fender, R. P.* Giant repeated ejections from GRS 1915+105 / R. P. Fender, G. G. Pooley // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2000. — Окт. — Т. 318, № 1. — С. L1—L5. — arXiv: [astro-ph/0006278](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006278) [[astro-ph](#)].
85. INTEGRAL observations of SS433: system's parameters and nutation of supercritical accretion disc / A. M. Cherepashchuk [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — Дек. — Т. 436, № 3. — С. 2004—2013. — arXiv: [1309.2440](https://arxiv.org/abs/1309.2440) [[astro-ph.HE](#)].
86. *Blundell, K. M.* SS433's accretion disc, wind and jets: before, during and after a major flare / K. M. Blundell, L. Schmidtbreick, S. Trushkin // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011. — Нояб. — Т. 417, № 4. — С. 2401—2410. — arXiv: [1104.2917](https://arxiv.org/abs/1104.2917) [[astro-ph.GA](#)].
87. The complex, variable structure of stationary lines in SS 433. / R. Falomo [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1987. — Янв. — Т. 224. — С. 323—334.
88. *Perez M., S.* SS433's circumbinary ring and accretion disc viewed through its attenuating disc wind / S. Perez M., K. M. Blundell // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — Окт. — Т. 408, № 1. — С. 2—8.
89. *Blundell, K. M.* SS 433: Observation of the Circumbinary Disk and Extraction of the System Mass / K. M. Blundell, M. G. Bowler, L. Schmidtbreick // ApJL. — 2008. — Май. — Т. 678, № 1. — С. L47.
90. *Perez M., S.* Inflow and outflow from the accretion disc of the microquasar SS433: UKIRT spectroscopy / S. Perez M., K. M. Blundell // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2009. — Авг. — Т. 397, № 2. — С. 849—856. — arXiv: [0904.4228](https://arxiv.org/abs/0904.4228) [[astro-ph.HE](#)].
91. Recent Radio Monitoring of Microquasars with RATAN-600 Radio Telescope / S. A. Trushkin [и др.] // The Obscured Universe. Proceedings of the VI INTEGRAL Workshop. Т. 622. — 01.2007. — С. 357. — (ESA Special Publication). — arXiv: [astro-ph/0702393](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0702393) [[astro-ph](#)].
92. Simultaneous radio and X-ray activity in SS 433. / E. R. Seaquist [и др.] // ApJ. — 1982. — Сент. — Т. 260. — С. 220—232.
93. Monitoring of very rapid changes in the optical spectrum of SS 433 in may/june 1987. / R. C. Vermeulen [и др.] // A&A. — 1993. — Март. — Т. 270. — С. 204—222.

94. SS 433: results of a recent multiwavelength campaign / S. K. Chakrabarti [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Сент. — Т. 362, № 3. — С. 957–965. — arXiv: [astro-ph/0501285](#) [[astro-ph](#)].
95. Evolving radio structure of the binary star SS433 at a resolution of 15 mas / R. C. Vermeulen [и др.] // *Nature*. — 1987. — Июль. — Т. 328, № 6128. — С. 309–313.
96. The inner radio jet region and the complex environment of SS433 / Z. Paragi [и др.] // *A&A*. — 1999. — Авг. — Т. 348. — С. 910–916. — arXiv: [astro-ph/9907169](#) [[astro-ph](#)].
97. Observations of SS 433 at 2695 and 8085 MHz, 1979-1985 / R. L. Fiedler [и др.] // *Astronomical Journal*. — 1987. — Ноябрь. — Т. 94. — С. 1244.
98. *Kopylov, I. M.* Spectrum of SS433 in the Stage of Flare Activity - 1980JUL / I. M. Kopylov, R. N. Kumaigorodskaya, T. A. Somova //. — 1985. — Апр. — Т. 29. — С. 186–194.
99. *Medvedev, P. S.* Diagnostics of Parameters for the X-ray Jets of SS 433 from High-Resolution Chandra Spectroscopy / P. S. Medvedev, I. I. Khabibullin, S. Y. Sazonov // *Astronomy Letters*. — 2019. — Май. — Т. 45, № 5. — С. 299–320. — arXiv: [2005.12416](#) [[astro-ph.HE](#)].
100. One more powerful outburst of SS 433 / V. P. Goranskij [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2018. — Июль. — Т. 11870. — С. 1.
101. A giant radio flare from SS433 again / S. A. Trushkin [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2018. — Авг. — Т. 11989. — С. 1.
102. Swift follow-up of a bright optical outburst from SS 433 / I. Khabibullin [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2018. — Авг. — Т. 11975. — С. 1.
103. The Giant Flares of the Microquasar Cygnus X-3: X-Rays States and Jets / S. Trushkin [и др.] // *Galaxies*. — 2017. — Ноябрь. — Т. 5, № 4. — С. 86.
104. The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images / M. Matsuoka [и др.] //. — 2009. — Окт. — Т. 61. — С. 999. — arXiv: [0906.0631](#) [[astro-ph.IM](#)].
105. Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei and Microquasars / G. E. Romero [и др.] // *Space Science Reviews*. — 2017. — Июль. — Т. 207, № 1–4. — С. 5–61. — arXiv: [1611.09507](#) [[astro-ph.HE](#)].

106. A dark jet dominates the power output of the stellar black hole Cygnus X-1 / E. Gallo [и др.] // *Nature*. — 2005. — Август. — Т. 436, № 7052. — С. 819–821. — arXiv: [astro-ph/0508228](#) [[astro-ph](#)].
107. LOFAR 150-MHz observations of SS 433 and W 50 / J. W. Broderick [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Апрель. — Т. 475, № 4. — С. 5360–5377. — arXiv: [1802.03406](#) [[astro-ph.HE](#)].
108. Multiwavelength Observations of the SS 433 Jets / H. L. Marshall [и др.] // *ApJ*. — 2013. — Сентябрь. — Т. 775, № 1. — С. 75. — arXiv: [1307.8427](#) [[astro-ph.HE](#)].
109. Rapid variability of the arcsec-scale X-ray jets of SS 433 / S. Migliari [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Апрель. — Т. 358, № 3. — С. 860–868. — arXiv: [astro-ph/0501097](#) [[astro-ph](#)].
110. *Khabibullin, I. I.* Identification of X-ray lines in the spectrum of the arcsec-scale precessing jets of SS 433 / I. I. Khabibullin, S. Y. Sazonov // *Astronomy Letters*. — 2017. — Июнь. — Т. 43, № 6. — С. 388–399. — arXiv: [1701.05884](#) [[astro-ph.HE](#)].
111. A new lepto-hadronic model applied to the first simultaneous multiwavelength data set for Cygnus X-1 / D. Kantzas [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Январь. — Т. 500, № 2. — С. 2112–2126. — arXiv: [2010.08501](#) [[astro-ph.HE](#)].
112. The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) / M. C. Weisskopf [и др.] // *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*. Т. 9905 / под ред. J.-W. A. den Herder, T. Takahashi, M. Bautz. — 07.2016. — С. 990517. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
113. The Imaging X-Ray Polarimetry Explorer (IXPE): Pre-Launch / M. C. Weisskopf [и др.] // *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*. — 2022. — Апрель. — Т. 8, № 2. — С. 026002. — arXiv: [2112.01269](#) [[astro-ph.IM](#)].
114. The Radio and X-Ray Association in Massive Jet Ejection Events of GRS 1915+105 / N. Masaaki [и др.] // *VI Microquasar Workshop: Microquasars and Beyond*. — 01.2006. — С. 83.1.

115. Spectral, polarization and time-lag properties of GRS 1915+105 radio oscillations / R. P. Fender [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Февр. — Т. 330, № 1. — С. 212–218. — arXiv: [astro-ph/0110501](#) [[astro-ph](#)].
116. The Superluminal Source GRS 1915+105: A High Mass X-Ray Binary? / I. F. Mirabel [и др.] // *ApJL*. — 1997. — Март. — Т. 477, № 1. — С. L45–L48.
117. 10 Micron Detection of the Hard X-Ray Transient GRO J0422+32: Free-Free Emission from an X-Ray-driven Accretion Disk Wind? / J. van Paradijs [и др.] // *ApJL*. — 1994. — Июль. — Т. 429. — С. L19.
118. *Sams, B. J.* Near-infrared jets in the Galactic microquasar GRS1915+105 / B. J. Sams, A. Eckart, R. Sunyaev // *Nature*. — 1996. — Июль. — Т. 382, № 6586. — С. 47–49.
119. Infrared Observations of an Energetic Outburst in GRS 1915+105 / I. F. Mirabel [и др.] // *ApJL*. — 1996. — Дек. — Т. 472. — С. L111.
120. A model-independent analysis of the variability of GRS 1915+105 / T. Belloni [и др.] // *A&A*. — 2000. — Март. — Т. 355. — С. 271–290. — arXiv: [astro-ph/0001103](#) [[astro-ph](#)].
121. *Pooley, G. G.* The variable radio emission from GRS 1915+105 / G. G. Pooley, R. P. Fender // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1997. — Дек. — Т. 292, № 4. — С. 925–933. — arXiv: [astro-ph/9708171](#) [[astro-ph](#)].
122. Evidence for a Disk-Jet Interaction in the Microquasar GRS 1915+105 / S. S. Eikenberry [и др.] // *ApJL*. — 1998. — Февр. — Т. 494, № 1. — С. L61–L64. — arXiv: [astro-ph/9710374](#) [[astro-ph](#)].
123. Hard X-ray states and radio emission in GRS 1915+105 / M. Klein-Wolt [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Апр. — Т. 331, № 3. — С. 745–764. — arXiv: [astro-ph/0112044](#) [[astro-ph](#)].
124. *Punsly, B.* The Relationship between X-Ray Luminosity and Major Flare Launching in GRS 1915+105 / B. Punsly, J. Rodriguez // *ApJ*. — 2013. — Февр. — Т. 764, № 2. — С. 173. — arXiv: [1212.0450](#) [[astro-ph.HE](#)].
125. The 2005 October Multiwavelength Campaign of GRS 1915+105 / Y. Ueda [и др.] // *VI Microquasar Workshop: Microquasars and Beyond*. — 01.2006. — С. 23.1.

126. *Fender, R.* GRS 1915+105 and the Disc-Jet Coupling in Accreting Black Hole Systems / R. Fender, T. Belloni // Annual Review of Astron and Astrophys. — 2004. — Сент. — Т. 42, № 1. — С. 317–364. — arXiv: [astro-ph/0406483](#) [[astro-ph](#)].
127. Radio and X-Ray Variability of the Galactic Superluminal Source GRS 1915+105 / R. S. Foster [и др.] // ApJL. — 1996. — Август. — Т. 467. — С. L81.
128. *Morgan, E. H.* RXTE Observations of QPOs in the Black Hole Candidate GRS 1915+105 / E. H. Morgan, R. A. Remillard, J. Greiner // ApJ. — 1997. — Июнь. — Т. 482, № 2. — С. 993–1010.
129. *Done, C.* GRS 1915+105: the brightest Galactic black hole / C. Done, G. Wardziński, M. Gierliński // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2004. — Апрель. — Т. 349, № 2. — С. 393–403. — arXiv: [astro-ph/0308536](#) [[astro-ph](#)].
130. *Ueda, Y.* GRS 1915+105 in “Soft State”: Nature of Accretion Disk Wind and Origin of X-ray Emission / Y. Ueda, K. Yamaoka, R. Remillard // ApJ. — 2009. — Апрель. — Т. 695, № 2. — С. 888–899. — arXiv: [0901.1982](#) [[astro-ph.HE](#)].
131. *Reig, P.* Does GRS 1915+105 exhibit “canonical” black-hole states? / P. Reig, T. Belloni, M. van der Klis // A&A. — 2003. — Декабрь. — Т. 412. — С. 229–233. — arXiv: [astro-ph/0309283](#) [[astro-ph](#)].
132. Faint Infrared Flares from the Microquasar GRS 1915+105 / S. S. Eikenberry [и др.] // ApJL. — 2000. — Март. — Т. 532, № 1. — С. L33–L36. — arXiv: [astro-ph/0001472](#) [[astro-ph](#)].
133. *Mirabel, I. F.* A superluminal source in the Galaxy / I. F. Mirabel, L. F. Rodríguez // Nature. — 1994. — Сент. — Т. 371, № 6492. — С. 46–48.
134. MERLIN observations of relativistic ejections from GRS 1915+105 / R. P. Fender [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1999. — Апрель. — Т. 304, № 4. — С. 865–876. — arXiv: [astro-ph/9812150](#) [[astro-ph](#)].
135. Inner accretion disk disappearance during a radio flare in GRS 1915+105 / M. Feroci [и др.] // A&A. — 1999. — Ноябрь. — Т. 351. — С. 985–992. — arXiv: [astro-ph/9909465](#) [[astro-ph](#)].

136. *Yadav, J. S.* Disk-Jet Connection in the Microquasar GRS 1915+105 and Infrared and Radio Emission / J. S. Yadav // *ApJ*. — 2001. — Февр. — Т. 548, № 2. — С. 876—882. — arXiv: [astro-ph/0010280](#) [[astro-ph](#)].
137. Rapid infrared flares in GRS 1915+105: evidence for infrared synchrotron emission / R. P. Fender [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1997. — Окт. — Т. 290, № 4. — С. L65—L69. — arXiv: [astro-ph/9707317](#) [[astro-ph](#)].
138. *Fender, R. P.* Infrared synchrotron oscillations in GRS 1915+105 / R. P. Fender, G. G. Pooley // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Окт. — Т. 300, № 2. — С. 573—576. — arXiv: [astro-ph/9806073](#) [[astro-ph](#)].
139. *Blandford, R. D.* Relativistic jets as compact radio sources. / R. D. Blandford, A. Königl // *ApJ*. — 1979. — Авг. — Т. 232. — С. 34—48.
140. *Falcke, H.* The jet/disk symbiosis. III. What the radio cores in GRS 1915+105, NGC 4258, M 81 and SGR A\* tell us about accreting black holes / H. Falcke, P. L. Biermann // *A&A*. — 1999. — Февр. — Т. 342. — С. 49—56. — arXiv: [astro-ph/9810226](#) [[astro-ph](#)].
141. OSSE and RXTE Observations of GRS 1915+105: Evidence for Nonthermal Comptonization / A. A. Zdziarski [и др.] // *ApJL*. — 2001. — Июнь. — Т. 554, № 1. — С. L45—L48. — arXiv: [astro-ph/0104054](#) [[astro-ph](#)].
142. Gamma-Ray Spectral States of Galactic Black Hole Candidates / J. E. Grove [и др.] // *ApJ*. — 1998. — Июнь. — Т. 500, № 2. — С. 899—908. — arXiv: [astro-ph/9802242](#) [[astro-ph](#)].
143. Radiation mechanisms and geometry of Cygnus X-1 in the soft state / M. Gierliński [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1999. — Окт. — Т. 309, № 2. — С. 496—512. — arXiv: [astro-ph/9905146](#) [[astro-ph](#)].
144. Simultaneous X-ray and gamma-ray observations of CYG X-1 in the hard state by GINGA and OSSE / M. Gierlinski [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1997. — Июль. — Т. 288, № 4. — С. 958—964. — arXiv: [astro-ph/9610156](#) [[astro-ph](#)].
145. *Yamaoka, K.* X-ray Study of Accretion Flow in Galactic Microquasar GRS 1915+105 / K. Yamaoka, Y. Ueda, H. Inoue // *New Century of X-ray Astronomy*. Т. 251 / под ред. H. Inoue, H. Kunieda. — 01.2001. — С. 426. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).

146. Galactic Black-Hole Candidates Shining at the Eddington Luminosity / K.-y. Watarai [и др.] // . — 2000. — Февр. — Т. 52. — С. 133.
147. Energy dependence of a low frequency QPO in GRS 1915+105 / J. Rodriguez [и др.] // A&A. — 2002. — Апр. — Т. 386. — С. 271–279. — arXiv: [astro-ph/0202205](#) [[astro-ph](#)].
148. *Tagger, M.* An accretion-ejection instability in magnetized disks / M. Tagger, R. Pellat // A&A. — 1999. — Сент. — Т. 349. — С. 1003–1016. — arXiv: [astro-ph/9907267](#) [[astro-ph](#)].
149. Accretion-ejection instability and QPO in black hole binaries I. Observations / J. Rodriguez [и др.] // A&A. — 2002. — Май. — Т. 387. — С. 487–496. — arXiv: [astro-ph/0203324](#) [[astro-ph](#)].
150. *Varnière, P.* Accretion-ejection instability and QPO in black-hole binaries. II. Relativistic effects / P. Varnière, J. Rodriguez, M. Tagger // A&A. — 2002. — Май. — Т. 387. — С. 497–506. — arXiv: [astro-ph/0203325](#) [[astro-ph](#)].
151. *Naik, S.* Disk-jet connection in GRS 1915+105: X-ray soft dips as cause of radio flares / S. Naik, A. R. Rao // A&A. — 2000. — Окт. — Т. 362. — С. 691–696. — arXiv: [astro-ph/0008433](#) [[astro-ph](#)].
152. Study of the Largest Multiwavelength Campaign of the Microquasar GRS 1915+105 / Y. Ueda [и др.] // ApJ. — 2002. — ИЮНЬ. — Т. 571, № 2. — С. 918–935. — arXiv: [astro-ph/0202154](#) [[astro-ph](#)].
153. The very flat radio-millimetre spectrum of Cygnus X-1 / R. P. Fender [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2000. — Март. — Т. 312, № 4. — С. 853–858. — arXiv: [astro-ph/9910184](#) [[astro-ph](#)].
154. Variable circular polarization associated with relativistic ejections from GRS 1915 + 105 / R. P. Fender [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2002. — Окт. — Т. 336, № 1. — С. 39–46. — arXiv: [astro-ph/0204442](#) [[astro-ph](#)].
155. *McKinney, J. C.* General relativistic magnetohydrodynamic simulations of the jet formation and large-scale propagation from black hole accretion systems / J. C. McKinney // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2006. — ИЮНЬ. — Т. 368, № 4. — С. 1561–1582. — arXiv: [astro-ph/0603045](#) [[astro-ph](#)].

156. *Takeuchi, S.* Modified Slim-Disk Model Based on Radiation-Hydrodynamic Simulation Data: The Conflict between Outflow and Photon Trapping / S. Takeuchi, S. Mineshige, K. Ohsuga // . — 2009. — Август. — Т. 61. — С. 783. — arXiv: [0904.4598](https://arxiv.org/abs/0904.4598) [[astro-ph.HE](#)].
157. *Trushkin, S.* GRS1915+105: a week activity at level 100 mJy / S. Trushkin, A. N. Nizhelskij, N. N. Bursov // The Astronomer's Telegram. — 2008. — Май. — Т. 1509. — С. 1.
158. *Trushkin, S. A.* GRS1915+105: a very strong radio flare after a spike in hard X-rays / S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij // The Astronomer's Telegram. — 2010. — Октябрь. — Т. 2899. — С. 1.
159. Swift and Chandra Observations of GRS 1915+105 in an unusual, very low-flux state / J. M. Miller [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Май. — Т. 12743. — С. 1.
160. AMI-LA observation of radio flaring from GRS 1915+105 / S. Motta [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Май. — Т. 12773. — С. 1.
161. RATAN-600 multi-frequency measurements of GRS1915+105 / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Июнь. — Т. 12855. — С. 1.
162. New bright radio flare of GRS 1915+105 / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Ноябрь. — Т. 13304. — С. 1.
163. NICER detection of a strong X-ray flare from GRS 1915+105 / J. Homan [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Ноябрь. — Т. 13308. — С. 1.
164. Most bright radio flare of GRS 1915+105 for last decade / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2020. — Февр. — Т. 13442. — С. 1.
165. Probable Dust Scattering Rings from Flaring in the Black Hole GRS 1915+105 / J. M. Miller [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2023. — Апрель. — Т. 15976. — С. 1.
166. New short-time radio and X-ray flare from GRS1915+105 / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2023. — Март. — Т. 15964. — С. 1.
167. MAXI/GSC detection of X-ray rebrightening of GRS 1915+105 / S. Yamada [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2023. — Март. — Т. 15968. — С. 1.

168. A bright radio flare observed in GRS 1915+105 with the Medicina and RATAN radio telescopes with no X-ray counterpart in the INTEGRAL energy range / E. Egron [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2023. — Апр. — Т. 16008. — С. 1.
169. The radio, optical, X-ray (?), gamma -ray (?) star LSI +61 303. / P. C. Gregory [и др.] // Astronomical Journal. — 1979. — Июль. — Т. 84. — С. 1030—1036.
170. *Paredes, J. M.* Observations at 3.6 CM wavelength of the radio light curve of LSI +61 303. / J. M. Paredes, R. Estalella, A. Rius // A&A. — 1990. — Июнь. — Т. 232. — С. 377.
171. *Gregory, P. C.* Bayesian Analysis of Radio Observations of the Be X-Ray Binary LS I +61°303 / P. C. Gregory // ApJ. — 2002. — Авг. — Т. 575, № 1. — С. 427—434.
172. *Massi, M.* Radio Spectral Index Analysis and Classes of Ejection in LS I +61°303 / M. Massi, M. Kaufman Bernadó // ApJ. — 2009. — Сент. — Т. 702, № 2. — С. 1179—1189. — arXiv: [0908.2600](https://arxiv.org/abs/0908.2600) [[astro-ph.HE](#)].
173. Orbital parameters of the microquasar LS I +61 303 / J. Casares [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2005. — Июль. — Т. 360, № 3. — С. 1105—1109. — arXiv: [astro-ph/0504332](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504332) [[astro-ph](#)].
174. High resolution radio map of the X-ray binary LSI +61 303. / M. Massi [и др.] // A&A. — 1993. — Март. — Т. 269. — С. 249—254.
175. *Peracaula, M.* Rapid expansion in the VLBI structure of LSI+61(circ) 303 / M. Peracaula, D. C. Gabuzda, A. R. Taylor // A&A. — 1998. — Февр. — Т. 330. — С. 612—618.
176. Two-Frequency VLA Monitoring of LSI+61.303 deg during a Full Radio Period / J. M. Paredes [и др.] // IAU Colloq. 164: Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources. Т. 144 / под ред. J. A. Zensus, G. B. Taylor, J. M. Wrobel. — 01.1998. — С. 347. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
177. Simultaneous X-Ray and Radio Monitoring of the Unusual Binary LS I +61°303: Measurements of the Light Curve and High-Energy Spectrum / F. A. Harrison [и др.] // ApJ. — 2000. — Янв. — Т. 528, № 1. — С. 454—461. — arXiv: [astro-ph/9908076](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9908076) [[astro-ph](#)].

178. One-Sided Elongated Feature in LS I +61°303 / M. Massi [и др.] // *Astrophysics and Space Science Supplement*. — 2001. — ЯНВ. — Т. 276. — С. 125–126.
179. Hints for a fast precessing relativistic radio jet in LS I +61303 / M. Massi [и др.] // *A&A*. — 2004. — ЯНВ. — Т. 414. — С. L1–L4. — arXiv: [astro-ph/0312091](#) [[astro-ph](#)].
180. *Massi, M.* LS I +61°303 in the context of microquasars / M. Massi // *A&A*. — 2004. — ИЮЛЬ. — Т. 422. — С. 267–270. — arXiv: [astro-ph/0404605](#) [[astro-ph](#)].
181. *Massi, M.* The Enigmatic Compact Object in the Stellar System LS I +61°303: Accreting or Not Accreting? / M. Massi // *The Multicolored Landscape of Compact Objects and Their Explosive Origins*. Т. 924 / под ред. Т. di Salvo [и др.]. — AIP, 08.2007. — С. 729–736. — (American Institute of Physics Conference Series).
182. *Dhawan, V.* LS I +61 303 is a Be-Pulsar binary, not a Microquasar / V. Dhawan, A. Mioduszewski, M. Rupen // *VI Microquasar Workshop: Microquasars and Beyond*. — 01.2006. — С. 52.1.
183. *Massi, M.* VLBA images of the precessing jet of LS I +61°303 / M. Massi, E. Ros, L. Zimmermann // *A&A*. — 2012. — АПР. — Т. 540. — A142. — arXiv: [1203.4621](#) [[astro-ph.HE](#)].
184. *Massi, M.* Long-term periodicity in LS I +61°303 as beat frequency between orbital and precessional rate / M. Massi, F. Jaron // *A&A*. — 2013. — ИЮНЬ. — Т. 554. — A105. — arXiv: [1303.2007](#) [[astro-ph.HE](#)].
185. *Jaron, F.* Discovery of a periodical apoastron GeV peak in LS I +61°303 / F. Jaron, M. Massi // *A&A*. — 2014. — ДЕК. — Т. 572. — A105. — arXiv: [1412.2028](#) [[astro-ph.HE](#)].
186. *Massi, M.* Long-term OVRO monitoring of LS I +61°303: confirmation of the two close periodicities / M. Massi, F. Jaron, T. Hovatta // *A&A*. — 2015. — МАРТ. — Т. 575. — С. L9. — arXiv: [1502.00934](#) [[astro-ph.HE](#)].
187. *Massi, M.* Intrinsic physical properties and Doppler boosting effects in LS I +61°303 / M. Massi, G. Torricelli-Ciamponi // *A&A*. — 2014. — АПР. — Т. 564. — A23. — arXiv: [1402.3983](#) [[astro-ph.HE](#)].

188. Radio pulsations from a neutron star within the gamma-ray binary LS I +61° 303 / S.-S. Weng [и др.] // *Nature Astronomy*. — 2022. — Март. — Т. 6. — С. 698—702. — arXiv: [2203.09423](#) [[astro-ph.HE](#)].
189. *Massi, M.* Origin of the long-term modulation of radio emission of LS I +61°303 / M. Massi, G. Torricelli-Ciamponi // *A&A*. — 2016. — ЯНВ. — Т. 585. — A123. — arXiv: [1511.05621](#) [[astro-ph.HE](#)].
190. Infrared helium emission lines from Cygnus X-3 suggesting a Wolf-Rayet star companion / M. H. van Kerkwijk [и др.] // *Nature*. — 1992. — Февр. — Т. 355, № 6362. — С. 703—705.
191. A Precise Measurement of the Orbital Period Parameters of Cygnus X-3 / Y. Bhargava [и др.] // *ApJ*. — 2017. — Ноябрь. — Т. 849, № 2. — С. 141. — arXiv: [1709.07441](#) [[astro-ph.HE](#)].
192. An X-Ray Survey of the Cygnus Region / R. Giacconi [и др.] // *ApJL*. — 1967. — ИЮНЬ. — Т. 148. — С. L119.
193. Discovery of Giant Radio Outburst from Cygnus X-3 / P. C. Gregory [и др.] // *Nature*. — 1972. — Окт. — Т. 239, № 5373. — С. 440—443.
194. The Quiescent Level of Cygnus X-3 at 2.25 and 8.3 GHz: 1988-1992 / E. B. Waltman [и др.] // *Astronomical Journal*. — 1994. — ИЮЛЬ. — Т. 108. — С. 179.
195. Quenched Radio Emission in Cygnus X-3 / E. B. Waltman [и др.] // *Astronomical Journal*. — 1996. — Дек. — Т. 112. — С. 2690.
196. Discovery of Correlated Behavior between the Hard X-Ray and the Radio Bands in Cygnus X-3 / M. L. McCollough [и др.] // *ApJ*. — 1999. — ИЮНЬ. — Т. 517, № 2. — С. 951—955. — arXiv: [astro-ph/9810212](#) [[astro-ph](#)].
197. The hardness-intensity diagram of Cygnus X-3: revisiting the radio/X-ray states / K. I. I. Koljonen [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — ИЮЛЬ. — Т. 406, № 1. — С. 307—319. — arXiv: [1003.4351](#) [[astro-ph.HE](#)].
198. A giant radio flare from Cygnus X-3 with associated  $\gamma$ -ray emission / S. Corbel [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Апр. — Т. 421, № 4. — С. 2947—2955. — arXiv: [1201.3356](#) [[astro-ph.HE](#)].

199. A comprehensive study of high-energy gamma-ray and radio emission from Cyg X-3 / A. A. Zdziarski [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — Окт. — Т. 479, № 4. — С. 4399—4415. — arXiv: [1804.07460](https://arxiv.org/abs/1804.07460) [[astro-ph.HE](#)].
200. Time-sequenced Multi-Radio Frequency Observations of Cygnus X-3 in Flare / J. C. A. Miller-Jones [и др.] // ApJ. — 2004. — Янв. — Т. 600, № 1. — С. 368—389. — arXiv: [astro-ph/0311277](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311277) [[astro-ph](#)].
201. First e-VLBI observations of Cygnus X-3 / V. Tudose [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2007. — Февр. — Т. 375, № 1. — С. L11—L15. — arXiv: [astro-ph/0611054](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0611054) [[astro-ph](#)].
202. *Spencer, R. E.* Apparent Relativistic Motion in Cygnus X-3 / R. E. Spencer // IAU Colloq. 164: Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources. Т. 144 / под ред. J. A. Zensus, G. B. Taylor, J. M. Wrobel. — 01.1998. — С. 337. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
203. The Nature of the First Cygnus X-3 Radio Outburst / P. C. Gregory [и др.] // Nature Physical Science. — 1972. — Окт. — Т. 239, № 95. — С. 114—117.
204. *Bash, F. N.* Recent Observations of Cyg X-3 at 365 MHz / F. N. Bash, F. D. Ghigo // Nature Physical Science. — 1973. — Янв. — Т. 241, № 109. — С. 93—94.
205. *Pal, S.* GMRT Low frequency radio observation of Cyg X-3 at the time of flare / S. Pal, A. P. Rao // The Astronomer's Telegram. — 2007. — Июнь. — Т. 1100. — С. 1.
206. *Pal, S.* GMRT low frequency radio observation of the giant flare from Cygnus X-3 / S. Pal, S. A. Trushkin, I. Chandra // The Astronomer's Telegram. — 2008. — Апр. — Т. 1486. — С. 1.
207. *Pal, S.* Multifrequency Observation of Cygnus X-3 at the Time of Giant Flare in 2006 May–June / S. Pal, C. H. Ishwara-Chandra, A. P. Rao // The Low-Frequency Radio Universe. Т. 407 / под ред. D. J. Saikia [и др.]. — 09.2009. — С. 277. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
208. Multi-frequency observation of Galactic micro-quasar Cygnus X-3 during flare / D. Patra [и др.] // Astronomical Society of India Conference Series. Т. 12. — 01.2015. — С. 125—126. — (Astronomical Society of India Conference Series).

209. *Marsh, K. A.* A Model for the Radio Bursts of Cygnus X-3 / K. A. Marsh, C. R. Purton, P. A. Feldman // *ApJ*. — 1974. — Сент. — Т. 192. — С. 697—702.
210. *Hjellming, R. M.* Radio Emission from Conical Jets Associated with X-Ray Binaries / R. M. Hjellming, K. J. Johnston // *ApJ*. — 1988. — Май. — Т. 328. — С. 600.
211. *Ball, L.* Synchrotron bubbles and radio transients. / L. Ball, M. Vlassis // *Publications of the Astron. Soc. of Australia*. — 1993. — ЯНВ. — Т. 10, № 4. — С. 342.
212. Low-frequency radio monitoring of microquasars / M. Pandey [и др.] // *A&A*. — 2007. — Февр. — Т. 463, № 2. — С. 567—577.
213. Cygnus X-3 entered in the quenched radio and hard X-ray state / S. A. Trushkin [и др.] // *ATEL*. — 2019. — Февр. — Т. 12510. — С. 1.
214. Discovery in Cygnus X-3 of Correlated Behaviour between the Hard X-Ray and Radio / M. L. McCollough [и др.] // *The Transparent Universe*. Т. 382 / под ред. C. Winkler, T. J. Courvoisier, P. Durouchoux. — 01.1997. — С. 265. — (ESA Special Publication).
215. Increase of the radio fluxes of Cygnus X-3 after / S. A. Trushkin [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2018. — Июль. — Т. 11805. — С. 1.
216. A major radio flare detected from Cyg X-3 with Metsahovi Radio Observatory at 37 GHz / K. Koljonen [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2019. — Апр. — Т. 12668. — С. 1.
217. Nasu telescope array observations of the recent Cyg X-3 flare at 1.4GHz / K. Tsubono [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2019. — Апр. — Т. 12700. — С. 1.
218. Evolution of multi-frequency emission from Cygnus X-3 in the current giant flare / S. A. Trushkin [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2019. — Апр. — Т. 12701. — С. 1.
219. AGILE detection of enhanced gamma-ray emission from Cygnus X-3 / G. Piano [и др.] // *The Astronomer's Telegram*. — 2019. — Апр. — Т. 12677. — С. 1.

220. Ongoing gamma-ray flaring activity from Cygnus X-3 detected by AGILE / G. Piano [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Апр. — Т. 12678. — С. 1.
221. Astrosat Observation of Cygnus X-3 in the Flaring State / M. Choudhury [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Май. — Т. 12741. — С. 1.
222. Strong low-frequency radio flaring from Cygnus X-3 observed with LOFAR / J. W. Broderick [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 504, № 1. — С. 1482—1494. — arXiv: [2104.04540](https://arxiv.org/abs/2104.04540) [[astro-ph.HE](#)].
223. LOFAR: The LOw-Frequency ARray / M. P. van Haarlem [и др.] // A&A. — 2013. — АВГ. — Т. 556. — А2. — arXiv: [1305.3550](https://arxiv.org/abs/1305.3550) [[astro-ph.IM](#)].
224. LOFAR imaging of Cygnus A - direct detection of a turnover in the hotspot radio spectra / J. P. McKean [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Дек. — Т. 463, № 3. — С. 3143—3150. — arXiv: [2103.16961](https://arxiv.org/abs/2103.16961) [[astro-ph.GA](#)].
225. *Majorova, E. K.* Experimental studies of the beam pattern of RATAN-600 / E. K. Majorova, S. A. Trushkin // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 2002. — ЯНВ. — Т. 54. — С. 89—122.
226. The Arcminute Microkelvin Imager / J. T. L. Zwart [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Дек. — Т. 391, № 4. — С. 1545—1558. — arXiv: [0807.2469](https://arxiv.org/abs/0807.2469) [[astro-ph](#)].
227. A digital correlator upgrade for the Arcminute MicroKelvin Imager / J. Hickish [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — Апр. — Т. 475, № 4. — С. 5677—5687. — arXiv: [1707.04237](https://arxiv.org/abs/1707.04237) [[astro-ph.IM](#)].
228. *Gregory, P. C.* The nature of Cygnus X-3 radio outbursts from an analysis of radiofrequency spectra. / P. C. Gregory, E. R. Seaquist // ApJ. — 1974. — Дек. — Т. 194. — С. 715—723.
229. *Marti, J.* Modelling Cygnus X-3 radio outbursts : particle injection into twin jets. / J. Marti, J. M. Paredes, R. Estalella // A&A. — 1992. — Май. — Т. 258. — С. 309.
230. Radio observations of GRS 1124-68 (X-ray Nova MUSCAE 1991) / L. Ball [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1995. — Апр. — Т. 273, № 3. — С. 722—730.

231. Observations at 408 MHz of the Cyg X-3 Radio Outburst / B. Anderson [и др.] // Nature Physical Science. — 1972. — Окт. — Т. 239, № 95. — С. 117—118.
232. Synchrotron flaring behaviour of Cygnus X-3 during the February-March 1994 and September 2001 outbursts / E. J. Lindfors [и др.] // A&A. — 2007. — Окт. — Т. 473, № 3. — С. 923—929. — arXiv: [0707.2808](https://arxiv.org/abs/0707.2808) [[astro-ph](#)].
233. *Fender, R.* Synchrotron self-absorption and the minimum energy of optically thick radio flares from stellar mass black holes / R. Fender, J. Bright // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Ноябрь. — Т. 489, № 4. — С. 4836—4846. — arXiv: [1907.07463](https://arxiv.org/abs/1907.07463) [[astro-ph.HE](#)].
234. *Fender, R.* Jets from X-ray binaries / R. Fender // Compact stellar X-ray sources. Т. 39 / под ред. W. H. G. Lewin, M. van der Klis. — 2006. — С. 381—419.
235. Rebrightening of Cygnus X-3 observed with Nasu telescope array at 1.4GHz. / K. Tsubono [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2019. — Янв. — Т. 12880. — С. 1.
236. Beginning of the new giant flare from Cygnus X-3 / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2020. — Февр. — Т. 13461. — С. 1.
237. New giant radio flare from Cyg X-3, correlated with X-rays and gamma-ray flares / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2020. — Июнь. — Т. 13835. — С. 1.
238. Monitoring of Microquasars with RATAN-600 / S. Trushkin [и др.] // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century. — 2020. — Дек. — С. 351—354.
239. *Green, D. A.* Arcminute MicroKelvin Imager observations at 15 GHz of the 2020 February Outburst of Cygnus X-3 / D. A. Green, P. Elwood //. — 2020. — Март. — Т. 4, № 3. — С. 36. — arXiv: [2003.05775](https://arxiv.org/abs/2003.05775) [[astro-ph.HE](#)].
240. Major and minor flares on Cygnus X-3 revisited / R. E. Spencer [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2022. — Май. — Т. 512, № 2. — С. 2618—2624. — arXiv: [2203.05637](https://arxiv.org/abs/2203.05637) [[astro-ph.SR](#)].
241. A new outburst from Cygnus X-3 observed with the Nasu telescope array at 1.4GHz / K. Tsubono [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Февр. — Т. 16455. — С. 1.

242. Recent outburst of Cygnus X-3 observed with the Nasu telescope array at 1.4GHz / K. Tsubono [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Март. — Т. 16520. — С. 1.
243. Very Bright Radio Flare Observed from Cyg X-3 with the ATA / W. Farah [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Февр. — Т. 16466. — С. 1.
244. Giant radio flare of Cyg X-3 observed with Medicina and SRT in April 2024 / E. Egron [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Апр. — Т. 16574. — С. 1.
245. The going-on bright flare from the X-ray binary Cygnus X-3 / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Апр. — Т. 16581. — С. 1.
246. The fourth giant flare of Cygnus X-3 in 2024 / S. A. Trushkin [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2024. — Июль. — Т. 16738. — С. 1.

## Приложение А

## Результаты измерений спектральных плотностей потока SS 433

Таблица 11 — Измерения плотностей потока SS433 на РАТАН-600 в 2018 г.

| Дата       | MJD       | $S_{\nu}$ в мЯн на частоте в ГГц |     |     |      |      | Сп. индекс |
|------------|-----------|----------------------------------|-----|-----|------|------|------------|
|            |           | 2.25                             | 4.7 | 8.2 | 11.2 | 22.3 |            |
| дд.мм.гггг |           |                                  |     |     |      |      |            |
| 16.06.2018 | 58285.948 | 1183                             | -   | 303 | -    | 626  | -0.86      |
| 17.06.2018 | 58286.946 | 940                              | -   | 235 | -    | 544  | -0.88      |
| 18.06.2018 | 58287.943 | 701                              | 403 | 403 | -    | 609  | -0.32      |
| 19.06.2018 | 58288.94  | 1108                             | 350 | 457 | -    | 854  | -0.48      |
| 20.06.2018 | 58289.938 | 1894                             | 600 | 617 | 835  | 1294 | -0.66      |
| 21.06.2018 | 58290.935 | 1470                             | 350 | 523 | 634  | 951  | -0.64      |
| 22.06.2018 | 58291.932 | 1408                             | 300 | 350 | 459  | 771  | -0.89      |
| 23.06.2018 | 58292.929 | 1163                             | 232 | 283 | 334  | 590  | -0.96      |
| 24.06.2018 | 58293.927 | 1414                             | 600 | 297 | 392  | 587  | -1.15      |
| 25.06.2018 | 58294.924 | 943                              | 264 | 237 | 347  | 590  | -0.80      |
| 26.06.2018 | 58295.921 | 982                              | 275 | 271 | 404  | 563  | -0.78      |
| 27.06.2018 | 58296.918 | 946                              | 550 | 266 | 310  | 514  | -0.93      |
| 28.06.2018 | 58297.916 | 752                              | 340 | 319 | 312  | 488  | -0.65      |
| 29.06.2018 | 58298.913 | 869                              | -   | 340 | 312  | 501  | -0.74      |
| 30.06.2018 | 58299.91  | 805                              | -   | 237 | 362  | 526  | -0.63      |
| 01.07.2018 | 58300.908 | 731                              | 330 | 258 | 325  | 497  | -0.67      |
| 02.07.2018 | 58301.905 | -                                | 300 | 298 | 346  | 476  | -0.94      |
| 03.07.2018 | 58302.902 | 761                              | 264 | 274 | 302  | 470  | -0.71      |
| 04.07.2018 | 58303.899 | 806                              | 250 | 298 | 232  | 345  | -0.91      |
| 05.07.2018 | 58304.897 | 717                              | 350 | 297 | 370  | 586  | -0.52      |
| 06.07.2018 | 58305.894 | 737                              | 275 | 306 | 367  | 506  | -0.56      |
| 07.07.2018 | 58306.891 | 752                              | 330 | 306 | 390  | 529  | -0.56      |
| 08.07.2018 | 58307.888 | 879                              | 326 | 323 | -    | 554  | -0.66      |
| 09.07.2018 | 58308.885 | 811                              | 341 | 260 | -    | 527  | -0.70      |
| 10.07.2018 | 58309.882 |                                  | 136 | 317 | -    | 518  | -          |
| 11.07.2018 | 58310.88  | 887                              | 300 | 309 | 421  | 540  | -0.66      |
| 12.07.2018 | 58311.877 | 792                              | 200 | 310 | 359  | 540  | -0.58      |
| 13.07.2018 |           |                                  |     |     |      |      |            |

Таблица 11 — Продолжение измерений SS433

| Дата       | MJD       | $S_{\nu}$ в мЯн на частоте в ГГц |     |     |      |      | Сп. индекс |
|------------|-----------|----------------------------------|-----|-----|------|------|------------|
| дд.мм.гггг |           | 2.25                             | 4.7 | 8.2 | 11.2 | 22.3 | $\alpha$   |
| 14.07.2018 | 58313.872 | 916                              | 350 | 256 | 353  | 537  | -0.82      |
| 15.07.2018 |           |                                  |     |     |      |      |            |
| 16.07.2018 | 58315.867 | 822                              | 400 | 353 | 318  | 450  | -0.73      |
| 17.07.2018 | 58316.864 | 1124                             | 440 | 788 | 995  | 1205 | -0.05      |
| 18.07.2018 | 58317.861 | 1842                             | 350 | 677 | 855  | 1350 | -0.54      |
| 19.07.2018 | 58318.858 | 1525                             | 350 | 421 | 598  | 944  | -0.75      |
| 20.07.2018 | 58319.855 | 1254                             | 240 | 352 | 417  | 653  | -0.86      |
| 21.07.2018 | 58320.852 | 1150                             | 400 | 217 | 463  | 714  | -0.83      |
| 22.07.2018 |           |                                  |     |     |      |      |            |
| 23.07.2018 | 58322.846 | 1957                             | 520 | 844 | 951  | 1257 | -0.55      |
| 24.07.2018 | 58323.843 | 2014                             | 570 | 649 | 751  | 1220 | -0.75      |
| 25.07.2018 | 58324.84  | 1622                             | 230 | 552 | 640  | 903  | -0.71      |
| 26.07.2018 | 58325.837 | 1326                             | 357 | 365 | 528  | 765  | -0.79      |
| 27.07.2018 | 58326.834 | 1077                             | 350 | 305 | 356  | 595  | -0.87      |
| 28.07.2018 | 58327.831 | 1326                             | 285 | 296 | 396  | 522  | -1.08      |
| 29.07.2018 | 58328.828 | 867                              | 320 | 216 | 325  | 529  | -0.83      |
| 30.07.2018 | 58329.825 | 864                              | 200 | 329 | 283  | 495  | -0.74      |
| 31.07.2018 | 58330.826 | 886                              | 250 | 310 | 289  | 500  | -0.79      |
| 01.08.2018 | 58331.823 | 735                              | 200 | 249 | 329  | 526  | -0.61      |
| 02.08.2018 | 58332.82  | 946                              | 310 | 267 | 364  | 515  | -0.83      |
| 03.08.2018 | 58333.817 | 896                              | 270 | 243 | 417  | 520  | -0.74      |
| 04.08.2018 | 58334.815 | 756                              | 246 | 287 | 370  | 539  | -0.57      |
| 05.08.2018 | 58335.812 | 807                              | 334 | 294 | 388  | 539  | -0.63      |
| 06.08.2018 | 58336.809 | 910                              | -   | 329 | 323  | 544  | -0.73      |
| 07.08.2018 | 58337.806 | 1048                             | 223 | 309 | 382  | 531  | -0.84      |
| 08.08.2018 | 58338.804 | -                                | 258 | 295 | 328  | 535  | -          |
| 09.08.2018 | 58339.801 | 874                              | 324 | 264 | 347  | 500  | -0.79      |
| 10.08.2018 | 58340.798 | 860                              | 215 | 255 | 342  | 487  | -0.77      |
| 11.08.2018 | 58341.796 | 833                              | 240 | 276 | 329  | 499  | -0.73      |
| 12.08.2018 | 58342.793 | 768                              | 270 | 380 | 393  | 521  | -0.49      |
| 13.08.2018 | 58343.79  | 953                              | 270 | 298 | 354  | 536  | -0.79      |

Таблица 11 — Продолжение измерений SS433

| Дата       | MJD       | $S_{\nu}$ в мЯн на частоте в ГГц |      |      |      |      | Сп. индекс |
|------------|-----------|----------------------------------|------|------|------|------|------------|
| дд.мм.гггг |           | 2.25                             | 4.7  | 8.2  | 11.2 | 22.3 | $\alpha$   |
| 14.08.2018 | 58344.787 | 946                              | 260  | 253  | 370  | 561  | -0.79      |
| 15.08.2018 | 58345.785 | 1006                             | 200  | 298  | 305  | 522  | -0.88      |
| 16.08.2018 | 58346.782 | 906                              | 293  | 272  | 380  | 528  | -0.76      |
| 17.08.2018 | 58347.779 | 1150                             | 182  | -    | -    | 583  | -          |
| 18.08.2018 | 58348.776 | -                                | 209  | -    | -    | 603  | -          |
| 19.08.2018 | 58349.774 | 956                              | 347  | -    | -    | 611  | -          |
| 20.08.2018 | 58350.771 | 1000                             | 230  | 353  | 444  | 592  | -0.66      |
| 21.08.2018 | 58351.768 | 1200                             | 1000 | 1005 | 948  | 886  | -0.19      |
| 22.08.2018 | 58352.765 | 1998                             | 591  | 936  | 1086 | 1584 | -0.43      |
| 23.08.2018 | 58353.762 | 2275                             | 467  | 674  | 791  | 1188 | -0.84      |
| 24.08.2018 | 58354.76  | 2165                             | 264  | 608  | 792  | 1177 | -0.79      |
| 25.08.2018 | 58355.757 | 3203                             | 544  | 968  | 1253 | 1973 | -0.71      |
| 26.08.2018 | 58356.754 | 4350                             | 779  | 1231 | 1679 | 2703 | -0.73      |
| 27.08.2018 | 58357.751 | 5142                             | 637  | 1345 | 1684 | 2710 | -0.85      |
| 28.08.2018 | 58358.748 | 3201                             | 552  | 1173 | 1439 | 1892 | -0.63      |
| 29.08.2018 | 58359.745 | 2419                             | 473  | 803  | 1049 | 1594 | -0.64      |
| 30.08.2018 | 58360.742 | 2103                             | 245  | 526  | 747  | 1150 | -0.82      |
| 31.08.2018 | 58361.739 | 1192                             | 339  | 489  | 499  | 946  | -0.54      |
| 01.09.2018 | 58362.736 | 1376                             | 350  | 395  | 536  | 836  | -0.76      |
| 02.09.2018 | 58363.734 | 1101                             | 185  | 348  | 493  | 697  | -0.64      |
| 03.09.2018 | 58364.731 | 1324                             | 550  | 727  | 838  | 791  | -0.42      |
| 04.09.2018 | 58365.728 | 1822                             | 423  | 1196 | 1359 | 1602 | -0.15      |
| 05.09.2018 | 58366.725 | 2317                             | 500  | 743  | 950  | 1365 | -0.72      |
| 06.09.2018 | 58367.722 | 1702                             | 500  | 543  | 676  | 978  | -0.76      |
| 07.09.2018 | 58368.719 | 1566                             | 368  | 466  | 555  | 874  | -0.81      |
| 08.09.2018 | 58369.716 | 1343                             | 240  | 404  | 511  | 785  | -0.75      |
| 09.09.2018 | 58370.716 | 1128                             | 236  | 296  | -    | 774  | -0.68      |
| 10.09.2018 | 58371.714 | 1511                             | 197  | 295  | -    | 655  | -1.09      |
| 11.09.2018 | 58372.711 | 1168                             | 174  | 412  | -    | 647  | -0.69      |
| 12.09.2018 | 58373.708 | 1478                             | 136  | 341  | -    | 574  | -1.08      |
| 13.09.2018 | 58374.705 | 831                              | 231  | 205  | -    | 560  | -0.71      |