

УДК 520.27:524.3-77-56

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКВАЗАРА ЛЕБЕДЬ X-3 НА ТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600 В РЕЖИМЕ МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 С. А. Трушкин<sup>1,2\*</sup>, А. В. Шевченко<sup>1</sup>, Н. Н. Бурсов<sup>1</sup>,  
П. Г. Цыбулев<sup>1</sup>, Н. А. Нижельский<sup>1</sup>, А. Н. Борисов<sup>1</sup>, А. А. Кудряшова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 1 декабря 2022 года; после доработки 8 февраля 2023 года; принята к публикации 25 февраля 2023 года

Мы проводим ежедневные наблюдения ярких микроквazarов на частотах 1.2–30 ГГц на Северном секторе РАТАН-600 более десяти лет. В измерениях 2019–2021 гг. мы зарегистрировали яркие вспышки, называемые гигантскими, так как плотности потока достигают рекордных значений — выше 20 Ян. Здесь представлены результаты внутрисуточной переменности микроквзара Лебедь X-3 в многоазимутальных наблюдениях на антенной системе «Южный сектор с плоским отражателем» гигантских вспышек Лебедь X-3. Это сделано впервые на короткой временной шкале (10 минут) и на нескольких частотах одновременно. Наблюдательный материал представляет собой 31 измерение в пределах  $\pm 2.7$  часа от времени кульминации объекта. Впервые была обнаружена эволюция спектра вспышечного излучения Лебедь X-3 на временной шкале, сравнимой с орбитальным периодом двойной системы. Данные измерения позволили определить временные и спектральные параметры радиоизлучения, которые характерны для вспышечного синхротронного излучения в релятивистских струях. Эволюция радиоизлучения рентгеновских двойных звезд на малых временных масштабах является ключом к пониманию образования струйных выбросов при аккреции вещества звезды-донора на релятивистский объект.

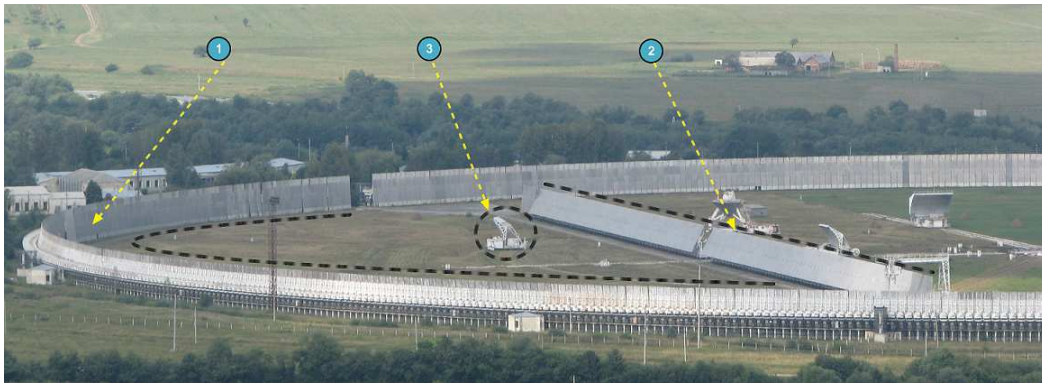
Ключевые слова: *звезды: двойные, рентгеновские, струйные выбросы, радиоисточники, синхротронное излучение*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская двойная система Лебедь X-3 — микроквazar с релятивистскими струйными выбросами — включает массивную звезду Вольфа-Райе (van Kerkwijk et al., 1992) и компактный объект (черную дыру или нейтронную звезду). Орбитальный период этой системы, определенный в ИК-диапазоне и по рентгеновским данным составляет 4.8 часа (Bhargava et al., 2017), то есть система очень компактна, а интенсивный звездный ветер от звезды-донора является одним из ключевых факторов, влияющих на особенности наблюдаемых струйных выбросов в периоды ярких вспышек. Как рентгеновский источник объект был обнаружен в 1967 году (Giaccconi et al., 1967), а мощные радиовспышки Лебедь X-3 наблюдаются с 1972 года, когда в серии из 22 работ в журнале «Nature» были подробно обсуждены свойства переменного радиоизлучения (см. Gregory et al. (1972)). Длительный мониторинг радиоизлучения был проведен в 1980–1990-е годы (Waltman et al., 1994; 1996) на

интерферметре НРАО (США). С запуском космических рентгеновских аппаратов (RXTE, BATSE, Swift) с ежедневными программами мониторинга стало ясно, что радиовспышки и рентгеновский поток всех микроквazarов сильно коррелируют (McCullough et al., 1999). Такая особенность получила наименование «сцепки» (coupling) различных процессов в рентгеновских двойных системах, обеспечивающих процесс аккреции вещества на релятивистский объект. Это в полной мере относится и к Лебедь 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 (Koljonen et al., 2010). 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 Лебедь X-3 также коррелирует со вспышечной активностью в радиодиапазоне (Corbel et al., 2012; Tavani et al., 2009) и интенсивно исследуется на космических

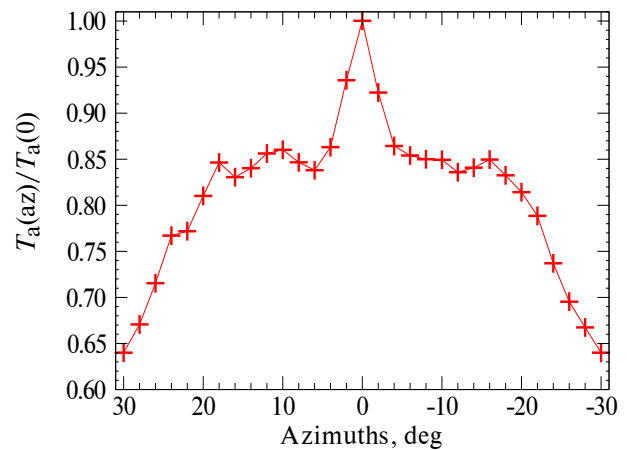
\*E-mail: sergei.trushkin@gmail.com



**Рис. 1.** Антенная система «Южный сектор с плоским отражателем» телескопа РАТАН-600. (1) — Южный сектор антенны, (2) — плоский отражатель, (3) — вторичное (третье) зеркало СВЧ-кабины.

обсерваториях Fermi/LAT и AGILE. Подробный анализ одновременных радио- (AMI-LA) и гамма- (Fermi/LAT) измерений был выполнен в работе Zdziarski et al. (2018). В обоих диапазонах обнаружена слабая модуляция излучения орбитальным периодом. Картографирование объекта на РСДБ-системе проводилось неоднократно, и были обнаружены струйные выбросы с релятивистскими движениями компонент струй (Miller-Jones et al., 2004; Tudose et al., 2007). Иногда такие движения были интерпретированы как «сверхсветовые», что, скорее всего, объясняется как движение в струях, направленных под малым углом к лучу зрения (Spencer, 1998). Очевидно, что при этом уменьшается и временной масштаб переменности.

Лебедь X-3 выделяется среди микроквазаров происходящими время от времени гигантскими радиовспышками, когда за несколько дней потоки могут вырасти в тысячи раз от предвспышечного уровня (Waltman et al., 1996). 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 (Trushkin et al., 2017). Такой период низкого радиопотока также характеризуются 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 (Koljonen et al., 2010). Вероятно, в таком состоянии почти полностью пропадают релятивистские радиоджеты. Внутрисуточная переменность Лебедь 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



**Рис. 2.** Зависимость нормированных антенных температур источника NGC 7027 от азимута антенной системы «Южный сектор с плоским отражателем».

для детального сопоставления и для поиска новых закономерностей.

## 2. РЕЖИМ МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения проводились на трехзеркальной антенной системе «Южный сектор с плоским отражателем» (рис. 1). 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 третьего зеркала в пределах  $\pm 30^\circ$ .

Третье зеркало можно относительно быстро перемещать по дуговым рельсам, имеющим радиус около 150 м, что позволяет менять азимут фокуса антенны и таким образом следить за источником на небе. В 2018 году в фокальной плоскости третьего зеркала были установлены три радиометра в диапазоне частот 4.7, 8.6 и 16 ГГц (см. таблицу 1).

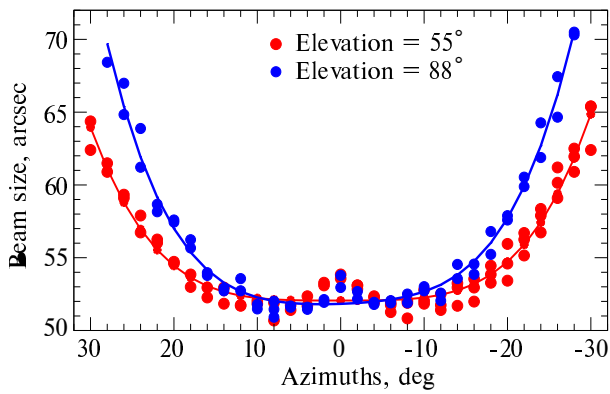


Рис. 3. Размер сечений луча многоазимутальной антенной системы «Южный сектор с плоским отражателем» для источников на двух разных склонениях.

Таблица 1. Параметры радиометрических комплексов. Обозначения:  $\nu$  — центральная частота (ГГц),  $\Delta\nu$  — ширина полосы (ГГц),  $\Delta S_\nu$  — чувствительность по плотности потока на единицу элемента разрешения (мЯн/луч), Phi05 — полуширина луча диаграммы направленности антенны в угловых секундах при прохождении источника со склонением  $\delta \sim 42^\circ$

$\nu$ , ГГц	$\Delta\nu$ , ГГц	$\Delta S_\nu$ , мЯн/луч	Phi05, угл. сек.
Северный сектор			
4.7	0.6	5	48
8.2	1	10	30
11.2	1.4	15	21
21.7	2.5	50	15
Южный сектор ЮП			
4.7*	0.6	10	72
4.7	0.6	10	72
8.6	1.4	20	39
16	2	60	30

\* — четырехлучевой комплекс

В июне 2019 года в фокальной плоскости третьего зеркала был временно установлен один из радиометров на частоте 4.7 ГГц четырехлучевого комплекса четырехканальных чувствительных приемников, работающих в режиме полной мощности и применяемых для поиска быстрых радиовсплесков. 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. В данных измерениях сигналы в узких каналах этого радиометра усреднялись в процессе обработки наблю-

дений. Этот приемник заменил прежний радиометр на частоте 4.7 ГГц, так как обладал более высокой чувствительностью в широкой полосе частот.

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. Расчет видимых мест источников осуществлялся с помощью эфемеридной программы EFRAT, созданной в ГАО РАН специально для использования на телескопе РАТАН-600 (Korzhasin et al., 2012). Рабочая программа EFRAT доступна на сервере РАТАН-600 и постоянно применяется для солнечных измерений и для измерений планет Солнечной системы. Основные параметры антенны (эффективная площадь и размер луча) были измерены в наблюдениях калибровочных источников (рис. 2 и 3). Эффективность антенны заметно падает на крайних азимутах из-за уменьшения апертуры Южного сектора, которая ограничена четвертью кругового отражателя РАТАН-600. Размер луча по траектории прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности менялся вследствие изменения параллактического угла. Вертикальный размер луча также менялся от  $37'$  в меридиане до  $50'$  в азимутах  $\pm 30^\circ$ .

Для ежедневного мониторинга Лебедь X-3 в меридиане использовалась обычная методика РАТАН-600 (Aliakberov et al., 1985) для радиометров полной мощности, подробный обзор которых дан в работе Tsybulev et al. (2018). На всех радиометрах установлены маломощные усилители на основе НЕМТ-транзисторов.

Калибровка плотности потока в многоазимутальном режиме была выполнена в наблюдениях яркой радиогалактики NGC 1275 (3C 84, J0319+41), планетарной туманности NGC 7027 (J2107+42) и H II области DR 21 (J2039+42). Наблюдения калибровочных источников на близких склонениях проводились аналогично наблюдениям исследуемого микроквзара, 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 Лебедь X-3. Радиоспектр J0319+41 был предварительно измерен в наблюдениях на Северном секторе, и потоки пересчитаны на те частоты, которые использовались в многоазимутальном режиме. Потоки NGC 7027 и DR 21 были приняты в соответствии с прецизионными измерениями в Ott et al. (1994) и с учетом векового падения потока из-за расширения оболочки NGC 7027. Опыт наблюдений опорных источников показывает, что общая точность привязки по плотности потока не хуже 3%.

**Таблица 2.** Таблица многоазимутальных измерений в 2019–2021 годах

Даты наблюдений	MJD	Опорные источники
19–28/04/2019	58592–58601	DR 21+3C 84
6–8,10/06/2019	58640–58644	DR 21+3C 84
18–29/06/2019	58652–58666	DR 21+3C 84
5–9,15–17/02/2020	58884–58896	NGC 7027
25–30/12/21	59573–58579	NGC 7027

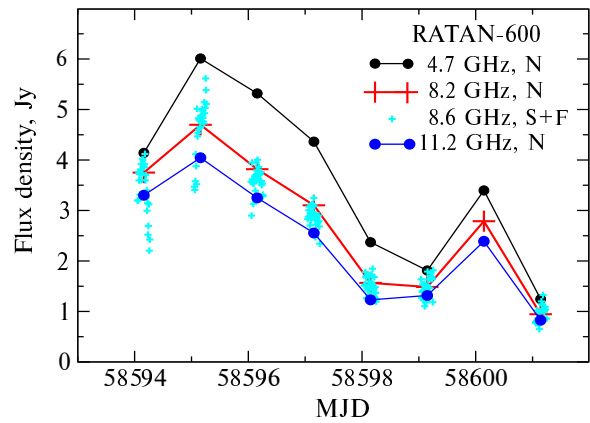
Обработка записей наблюдений проводилась с помощью пакета FADPS (Verkhodanov, 1997). В процессе обработки для увеличения отношения  $S/N$  применялась свертка записей наблюдений с расчетной диаграммой направленности РАТАН-600 или с кривыми прохождения ярких опорных источников. Точность измерений потоков на уровне выше 1 Ян была лучше 3% на 4.7 ГГц и около 5–10% на частотах 8.6 и 16 ГГц. На графиках вариаций спектрального индекса ошибка его определения была не ниже  $\pm 0.05$ . Высокая точность измерений на частоте 4.7 ГГц обеспечивалась высокими значениями потоков во время вспышек, то есть сигнал превышал шумы системы в десятки раз. Поэтому на графиках кривых блеска бары ошибок меньше размеров значков значений потока.

В сводной таблице 2 приведены даты многоазимутальных измерений Лебедь X-3, а также указаны опорные источники, использовавшиеся в наблюдениях. Для перечисленных в таблице интервалов дат программа мониторинга Лебедь X-3 на Северном секторе шла ежедневно.

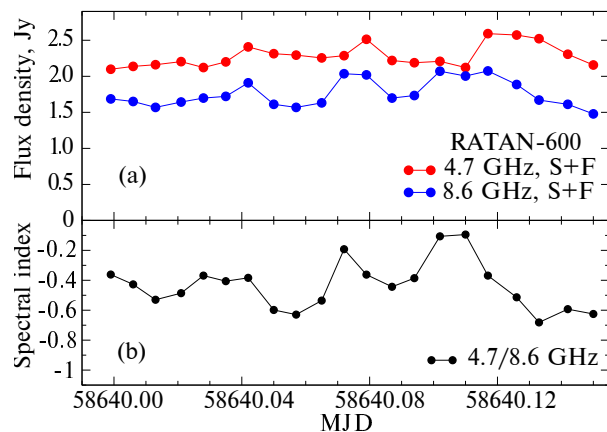
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

#### 3.1. Вспышечная активность Лебедь X-3 в апреле и июне 2019 года

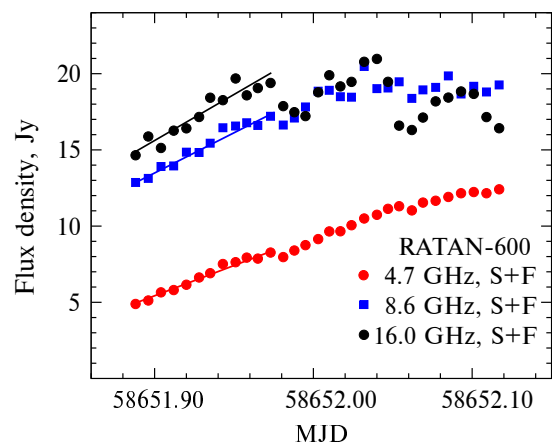
Этот период активности Лебедь X-3 включал два вспышечных состояния: в апреле–мае (Trushkin et al., 2019) и в июне 2019 года (Trushkin et al., 2020). В апреле 2019 г. режим многоазимутальных измерений был впервые применен для исследований микроквazarов (рис. 4). В июне 2019 г. начат мониторинг переменности Лебедь X-3. В интервалах дат, указанных в таблице 2, в ходе ежедневных наблюдений на частотах 4.7, 8.6 и 16 ГГц продолжительностью 5.5 часов проводились внутрисуточные измерения плотности потока объекта. Полученные кривые блеска представлены на рис. 5–7. Именно при мониторинге радиовспышек 2019 года была обнаружена быстрая (около 10 минут) переменность Лебедь X-3.



**Рис. 4.** Ежедневные измерения Лебедь X-3 в апреле 2019 года на Северном секторе (черные, красные, синие кружки) и на Южном секторе с плоским отражателем (крестики).



**Рис. 5.** Внутрисуточная переменность Лебедь X-3 по измерениям 6 июня 2019 года. На нижней панели показаны вариации спектрального индекса.



**Рис. 6.** Многоазимутальные измерения плотности потока микроквзара Лебедь X-3 на Южном секторе с плоским отражателем в первый день вспышки, 18 июня 2019 года.

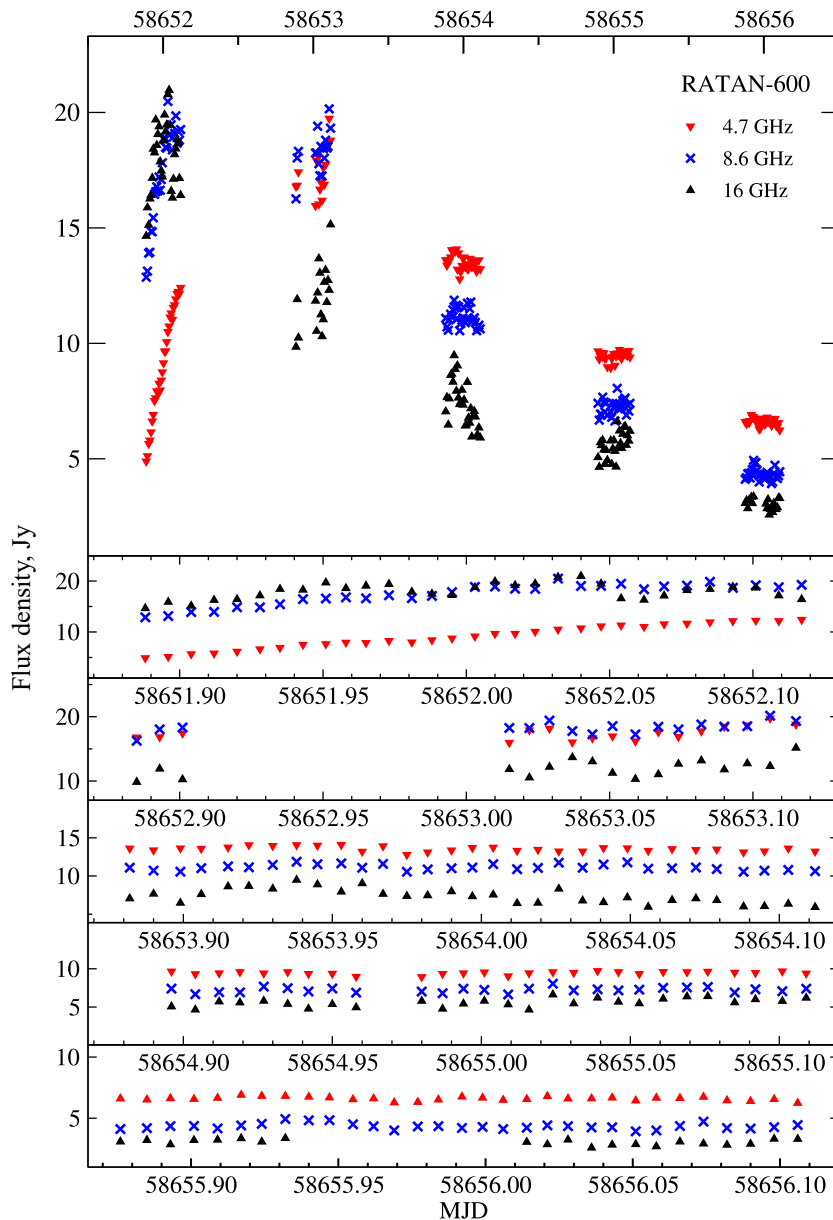


Рис. 7. Кривые блеска Лебедь X-3 на трех частотах в течение пяти дней: 18–22 июня 2019 года.

В начале июня наблюдались малые вспышки. Одна из них совпала со вспышкой в гамма-диапазоне, зафиксированной космической обсерваторией Fermi/LAT<sup>1</sup>. На рис. 5 показаны кривые блеска и изменение спектрального индекса в течение 6 июня 2019 года (MJD 58640). Видно, что спектр в малых вспышках сначала был ближе к плоскому, но затем становился обычным оптически тонким спектром.

Важным элементом проведенных наблюдений стали измерения потоков Лебедь X-3 на начальной

стадии развития 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. 6).

Рост плотности потока излучения (до момента достижения максимума вспышки) хорошо аппроксимируется простой линейной зависимостью:  $S_\nu \propto A(t - t_0)$ , где  $t_0$  — время начала вспышки. 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,

<sup>1</sup>[https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/ms1\\_lc/source/Cygnus\\_X-3](https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/ms1_lc/source/Cygnus_X-3)

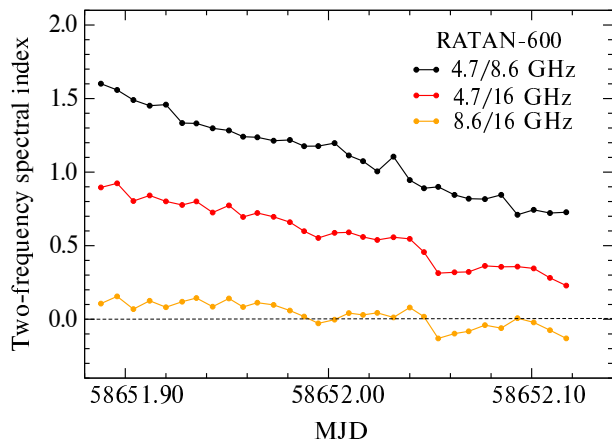


Рис. 8. Эволюция двухчастотного спектрального индекса в измерениях 18 июня 2019 года.

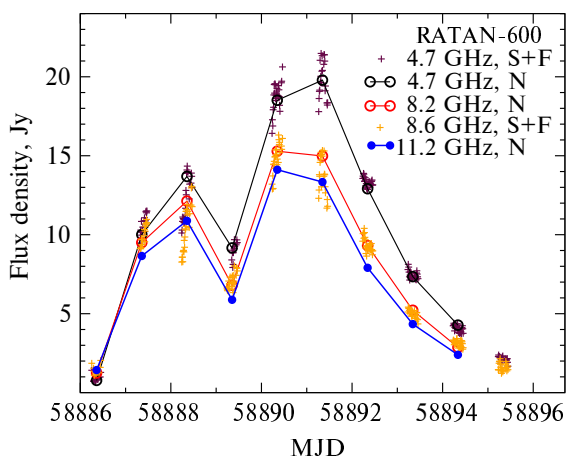


Рис. 9. Ежедневные измерения Лебедь X-3 в феврале 2020 года на Северном секторе (черные, красные и синие кружки), а также на Южном секторе с плоским отражателем (крестики).

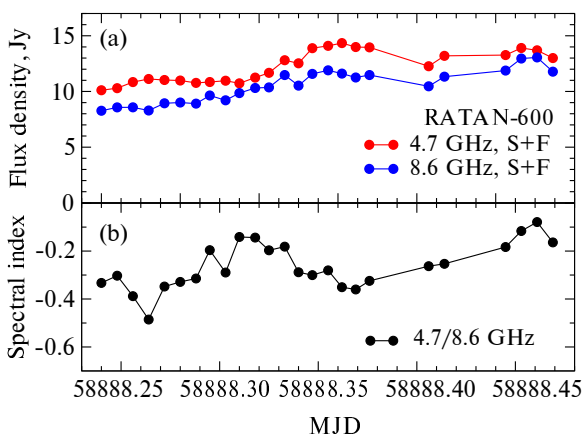


Рис. 10. Переменность Лебедь X-3 9 февраля 2020 года и эволюция спектрального индекса.

стоит отметить заметное смещение моментов начала вспышки от высокой к низкой частоте, что легко находит объяснение в модели подъема струйного выброса в поглощающей оболочке.

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  $\alpha_{8.6/16.0}$  (8.6–16.0 ГГц) был близок к нулю (рис. 8). 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.

Однако значение спектрального индекса, близкое к +2, указывает на то, что механизм теплового поглощения доминирует на фоне адиабатических энергетических потерь (или даже обратных комптоновских потерь) релятивистскими электронами.

### 3.2. Вспышечная активность Лебедь X-3 в феврале 2020 года

По наблюдениям 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 (Koljonen et al., 2010). 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. 9). Тогда же были проведены одновременные наблюдения на радиотелескопе AMI-LA (Green and Elwood, 2020; Spencer et al., 2022).

На рис. 10 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 происходило уменьшение спектрального индекса от  $-0.5$  до  $-0.1$ . Ежедневный многочастотный мониторинг микроквазаров и внутрисуточные измерения в периоды активных состояний Лебедь X-3 позволяют лучше понять связь джета и аккреционного диска в микроквазаре. В моделях синхротронного излучения мы можем оценить размеры и яркостную температуру областей излучения.

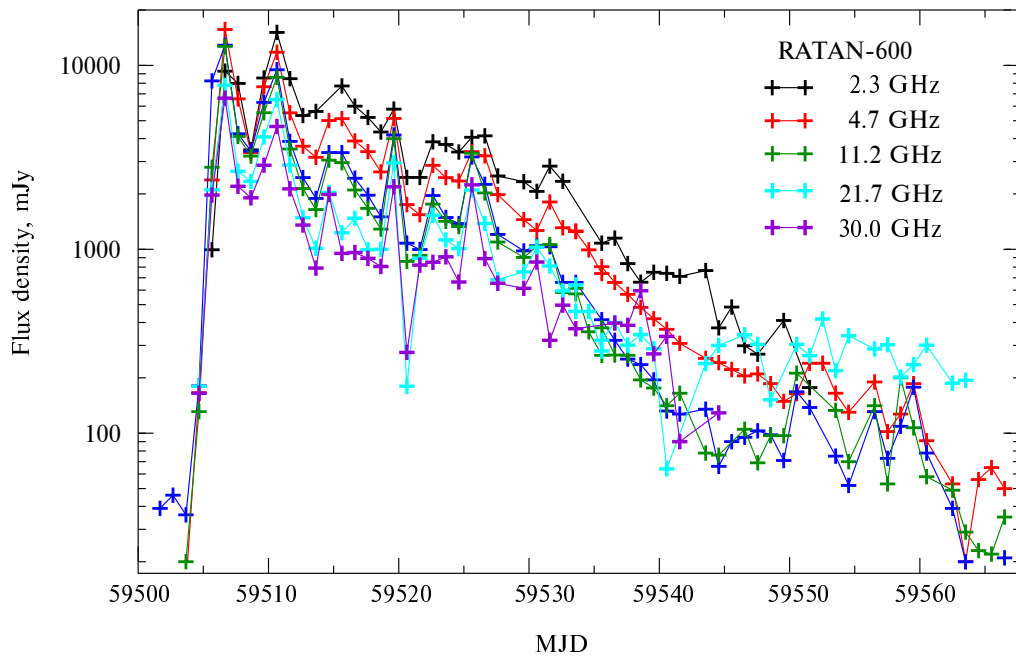


Рис. 11. Кривые блеска Лебедь X-3 в октябре—ноябре 2021 года по данным ежедневного мониторинга на Северном секторе телескопа РАТАН-600.

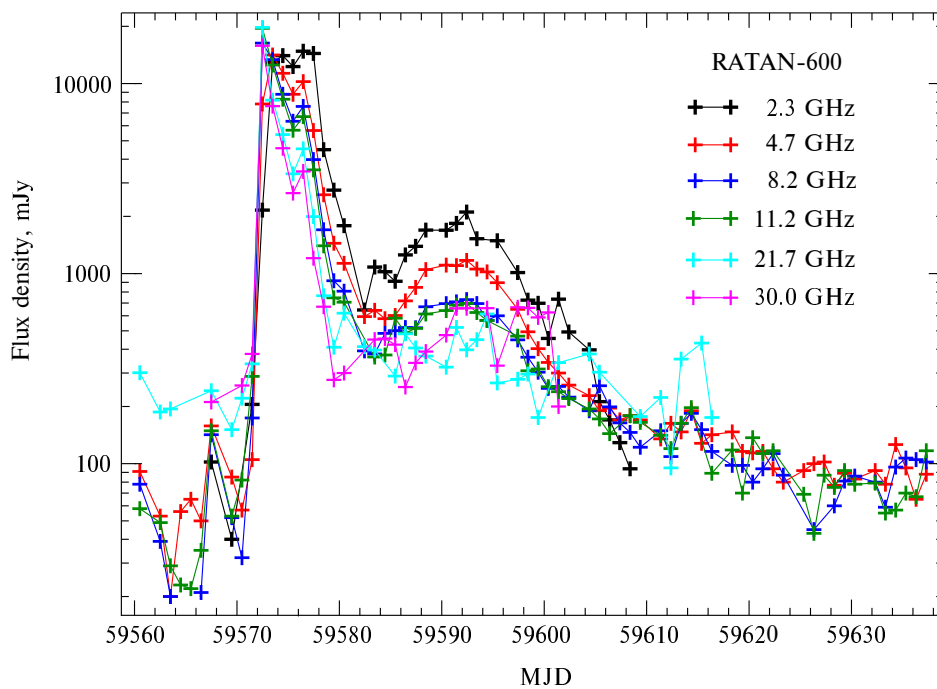


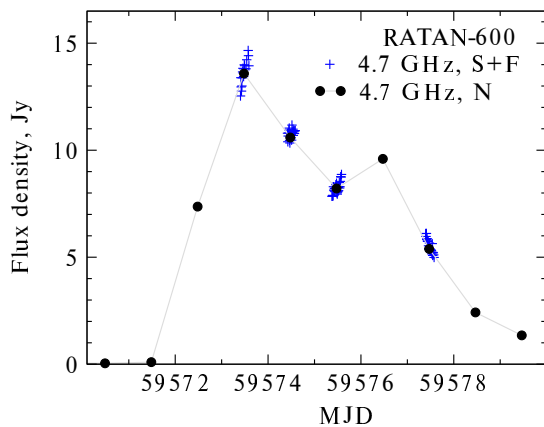
Рис. 12. Кривая блеска Лебедь X-3 в начале вспышки в декабре 2021 года по данным мониторинга и многоазимутальных измерений.

### 3.3. Вспышечная активность Лебедь X-3 в 2021 году

31 июля 2021 года во время мониторинга мы обнаружили гигантскую вспышку от микроквара 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



**Рис. 13.** Кривые блеска Лебедь X-3 на частоте 4.7 ГГц по измерениям на Северном секторе (черные точки) и на Южном секторе с Плоским отражателем (синие крестики) в декабре 2021 года.

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<sup>2</sup> в диапазоне 15–50 кэВ активное рентгеновское состояние продолжалось, и 18 октября 2021 года (MJD 59505) мы обнаружили необычную продолжительную гигантскую вспышку, когда поток в максимуме достиг почти 16 Ян на частоте 4.7 ГГц (рис. 11). Эта вспышка состояла из нескольких последовательных выбросов и закончилась через 45 дней, 2 декабря (MJD 59550).

Октябрьская 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 гигантскую вспышку (рис. 12), которая была довольно предсказуема, так как микроквазар оставался в гипермягком состоянии. И снова такой спектр определяется оптически толстыми (спектральный индекс  $\alpha = 1.6$ ) 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. 13).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Радиовспышки являются хорошим индикатором процесса формирования струйного выброса и общего роста активности в микроквазаре Лебедь X-3.

<sup>2</sup><https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/CygX-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 для более низких частот.

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 van der Laan (1966). Но для струй с конической геометрией такое расширение может быть экспоненциальным (Marti et al., 1992), когда довольно тонкие оболочки ударных волн в струях могут приводить к двумерному расширению.

Измеренные спектры указывали на оптически толстое излучение, вероятно, связанное с внутренним поглощением тепловыми электронами или с синхротронным самопоглощением, согласно Fender and Bright (2019). Плавная внутрисуточная переменность радиопотоков была обнаружена и на стадии затухания вспышек.

Здесь мы сосредоточились только на результатах наблюдений в новом для данной темы режиме. Более подробный анализ и применение различных моделей будет сделан в сопутствующей работе.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения выполнены на научном оборудовании радиотелескопа РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории РАН и поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ. Авторы искренне благодарны двум рецензентам за конструктивные замечания, которые способствовали улучшению статьи.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Часть наблюдательных данных получена на уникальной научной установке радиотелескоп РАТАН-600 САО РАН и работа по обработке наблюдательных данных выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003)

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. D. Aliakberov, M. G. Mingaliev, M. N. Naugol'naya, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **19**, 59 (1985).
2. Y. Bhargava, A. R. Rao, K. P. Singh, et al., *Astrophys. J.* **849** (2), article id. 141 (2017).
3. S. Corbel, G. Dubus, J. A. Tomsick, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421** (4), 2947 (2012).
4. R. Fender and J. Bright, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489** (4), 4836 (2019).
5. R. Giacconi, P. Gorenstein, H. Gursky, and J. R. Waters, *Astrophys. J.* **148**, L119 (1967).
6. D. A. Green and P. Elwood, *Research Notes Amer. Astron. Soc.* **4** (3), id. 36 (2020).
7. P. C. Gregory, P. P. Kronberg, E. R. Seaquist, et al., *Nature* **239** (5373), 440 (1972).
8. K. I. I. Koljonen, D. C. Hannikainen, M. L. McCollough, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **406** (1), 307 (2010).
9. A. N. Korzhavin, V. N. Lvov, S. K. Tokhchukova, and S. D. Tsekmeister, *Astrophysical Bulletin* **67** (2), 225 (2012).
10. J. Marti, J. M. Paredes, and R. Estalella, *Astron. and Astrophys.* **258**, 309 (1992).
11. M. L. McCollough, C. R. Robinson, S. N. Zhang, et al., *Astrophys. J.* **517** (2), 951 (1999).
12. J. C. A. Miller-Jones, K. M. Blundell, M. P. Rupen, et al., *Astrophys. J.* **600** (1), 368 (2004).
13. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
14. R. E. Spencer, *ASP Conf. Ser.* **144**, 337 (1998).
15. R. E. Spencer, M. Garrett, J. D. Bray, and D. A. Green, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **512** (2), 2618 (2022).
16. M. Tavani, A. Bulgarelli, G. Piano, et al., *Nature* **462** (7273), 620 (2009).
17. S. Trushkin, M. McCollough, N. Nizhelskij, and P. Tsybulev, *Galaxies* **5** (4), 86 (2017).
18. S. Trushkin, A. Shevchenko, N. Bursov, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020* Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, (*Spec. Astrophys. Obs. Russian Acad. Sci., Nizhnij Arkhyz, 2020*), pp. 351–354 (2020).
19. S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, P. G. Tsybulev, and A. V. Shevchenko, *The Astronomer's Telegram* **12510**, 1 (2019).
20. P. G. Tsybulev, N. A. Nizhelskij, M. V. Dugin, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 494 (2018).
21. V. Tudose, R. P. Fender, M. A. Garrett, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **375** (1), L11 (2007).
22. H. van der Laan, *Nature* **211** (5054), 1131 (1966).
23. M. H. van Kerkwijk, P. A. Charles, T. R. Geballe, et al., *Nature* **355** (6362), 703 (1992).
24. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
25. E. B. Waltman, R. L. Fiedler, K. J. Johnston, and F. D. Ghigo, *Astron. J.* **108**, 179 (1994).
26. E. B. Waltman, R. S. Foster, G. G. Pooley, et al., *Astron. J.* **112**, 2690 (1996).
27. A. A. Zdziarski, D. Malyshev, G. Dubus, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479** (4), 4399 (2018).

### Study of the Cygnus X-3 Microquasar with the RATAN-600 Radio telescope in Multi-Azimuth Observing Mode

S. A. Trushkin<sup>1,2</sup>, A. V. Shevchenko<sup>1</sup>, N. N. Bursov<sup>1</sup>, P. G. Tsybulev<sup>1</sup>, N. A. Nizhelskij<sup>1</sup>, A. N. Borisov<sup>1</sup> and A. A. Kudryashova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

We have been performing daily observations of bright microquasars at 1.2–20 GHz with the Northern sector of RATAN-600 radio telescope for more than ten years. During the 2019–2021 observations we recorded bright flares, which we call giant flares because fluxes reach record levels—above 20 Jy—during these events. In this paper we report the results of intraday variations of the Cygnus X-3 microquasar in multi-azimuth observations made with the “North sector with a flat-sheet reflector” during giant flares of Cygnus X-3. These were the first such observations made simultaneously at several frequencies on a short time scale (10 minutes). Observational data consists of 31 measurement made within  $\pm 2.7$  hours of the culmination of the object. We are the first to discover the evolution of the spectrum of the flare emission of Cygnus X-3 on a time scale comparable to the orbital period of the binary. The measurement data allowed us to determine the temporal and spectral parameters of radio emission, which are typical for synchrotron flare emission in relativistic jets. Evolution of the radio emission of X-ray binaries on short time scales is a key to understanding the formation of jet outbursts in the process of mass accretion of the matter of the donor star onto the relativistic object.

*Keywords: stars: individual: Cygnus X-3—ISM: jets and outflows radio continuum: stars*