

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(САО РАН)



«Исследование микроквазаров в радиодиапазоне – поиск и
исследование корреляций с другими диапазонами»

Аспирант

Аспирант, Шевченко А.В.

Научный руководитель

Заведующий лабораторией радиоастрофизики, д.ф.-м.н., Трушкин С.А.

Подразделение

Лаборатория радиоастрофизики

Направление 03.06.01 Физика и астрономия
Профиль 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

Цели и задачи

Название научно-квалификационной работы: Исследование микроквazarов в радиодиапазоне – поиск и исследование корреляций с другими диапазонами.

Микроквazarы – яркие и сильно переменные рентгеновские двойные звездные системы, синхротронное радиоизлучение которых происходит в коллимированных струйных выбросах релятивистских заряженных частиц.

Цель исследования – проследить эволюцию синхротронного радиоизлучения, вызванного релятивистским истечением вещества, в виде двух противоположно направленных струй. Найти закономерности эволюции. Провести исследование возможных корреляций переменного электромагнитного излучения в различных диапазонах, как индикатора взаимодействия оптической звезды, аккреционного диска вокруг релятивистского компаньона и струй.

Задачи исследования:

- 1) проведение многочастотного мониторинга выборки микроквazarов на РАТАН-600 на разных временных масштабах;
- 2) применение различных режимов наблюдений за яркими галактическими источниками на телескопе РАТАН-600;
- 3) участие в алертных программах наблюдений по исследованию микроквazarов в активном состоянии в различных диапазонах электромагнитных волн.

Актуальность, научная и практическая значимость

В последние годы, исследование микроквazarов ведется особенно интенсивно, а сами объекты входят в ключевые программы мониторинга на большинстве космических обсерваторий и спутниках рентгеновского и гамма-диапазонов.

Программа ежедневного мониторинга микроквazarов на РАТАН-600 продуктивна именно благодаря особенностям телескопа, относительной экономичности расходования антенного времени, многочастотности измерений.

Многочастотные кривые блеска исключительно важны для последующего сопоставления с данными в других диапазонах, а само вспышечное радиоизлучение является лучшим индикатором активности в микроквазаре.

На сегодняшний день существуют несколько групп исследователей, которые наблюдают активные состояния микроквazarов в различных диапазонах электромагнитного спектра, от радиоволн до гамма-лучей. Астрономические телеграммы, с данными наблюдений телескопа РАТАН-600, сообщающие о начале активности наблюдаемых объектов, часто вызывают включения алертных программ мониторинга на многих телескопах мира: INTEGRAL, MAXI, SMA, LOFAR, EHT, AMI-LA, Medicina и др. Данные радионаблюдений телескопа РАТАН-600 чрезвычайно востребованы среди исследователей космических нейтрино и гамма-излучения высоких энергий.

Исследование спектральных и временных зависимостей в радиодиапазоне на всех стадиях протекания вспышки, необходимы для моделирования эволюции синхротронного радиоизлучения микроквazarов, на основе изменения объема струйных выбросов, величины их магнитного поля и режима генерации и поглощения радиоизлучения от релятивистских электронов.

Научная новизна

Впервые на телескопе РАТАН-600, режим многоазимутальных наблюдений был применён для исследования внутрисуточной переменности рентгеновских двойных систем со струйными выбросами, когда на антенной системе "Южный сектор с плоским отражателем« в течение 5.5 часов вокруг кульминации источника проводилось 31 измерение плотностей потоков на одном или нескольких радиометрах в период гигантских вспышек микроквара **Cygnus X-3**, а также ярких вспышек **SS433** и **GRS1915+105**.

Впервые, по результатам анализа многочастотных внутрисуточных измерений гигантской вспышки 2019 года, в системе **Cygnus X-3** обнаружен линейный рост потока на временах от 1 до 5 часов на начальной фазе формирования струйного выброса. Подробно исследована эволюция спектрального индекса на данной этапе протекания вспышки.

В 2023 году в системе **GRS1915+105** впервые обнаружена одиночная гигантская вспышка, которая по своей яркости в радиодиапазоне практически в три раза превышала предыдущий исторический максимум.

Структура работы

Введение

Глава 1. Наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600

**Глава 2. Исследование переменности микроквара Cygnus X-3
в различных диапазонах электромагнитного спектра на разных временных масштабах**

Глава 3. Результаты мониторинга вспышечной активности микроквара SS433 в радиодиапазоне

Глава 4. Исследование вспышечных событий в микрокваре GRS 1915+105

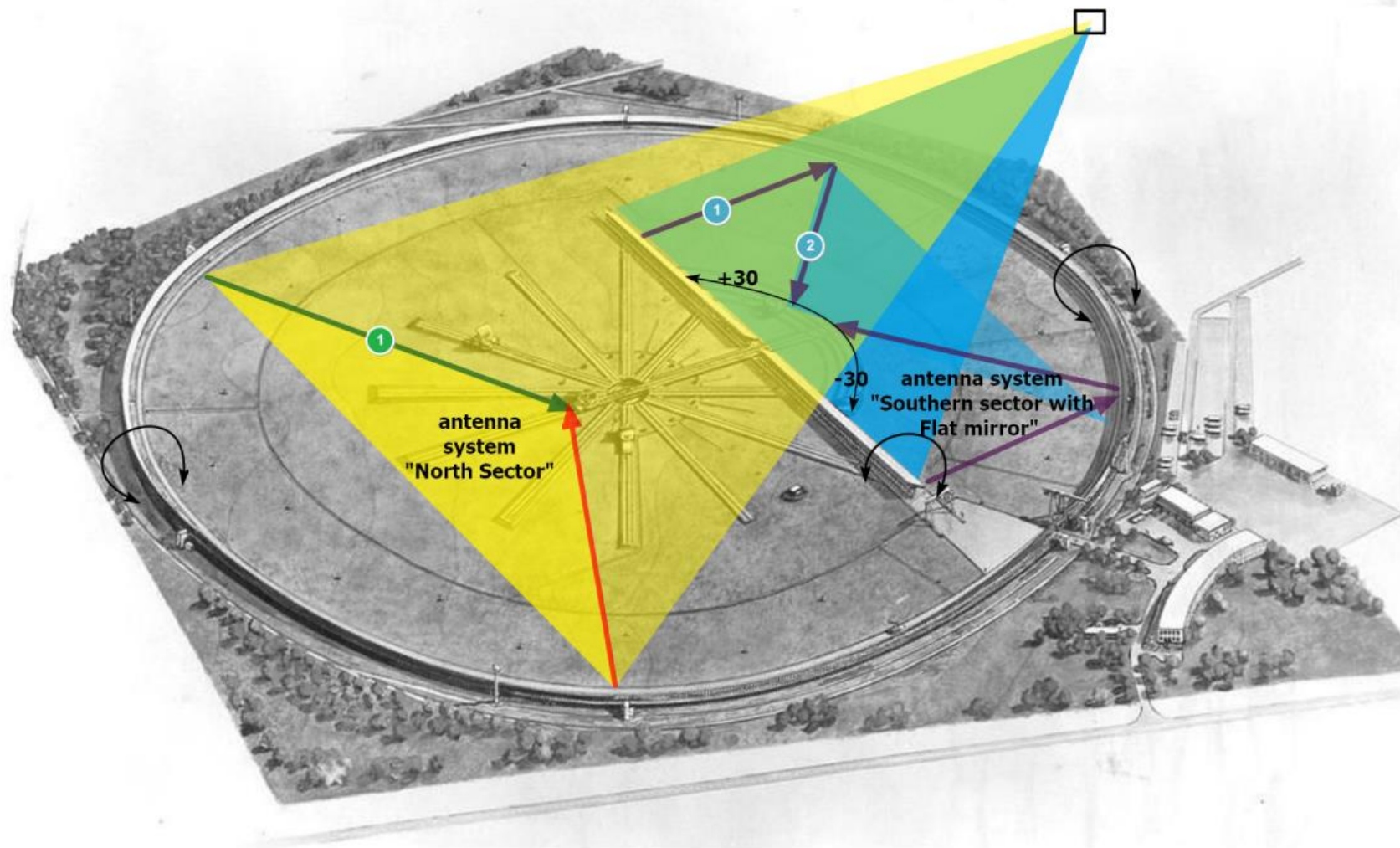
Глава 5. Анализ переменности и поиск периодичности в кривых блеска микроквара LSI+61d303

Заключение

Список используемых источников

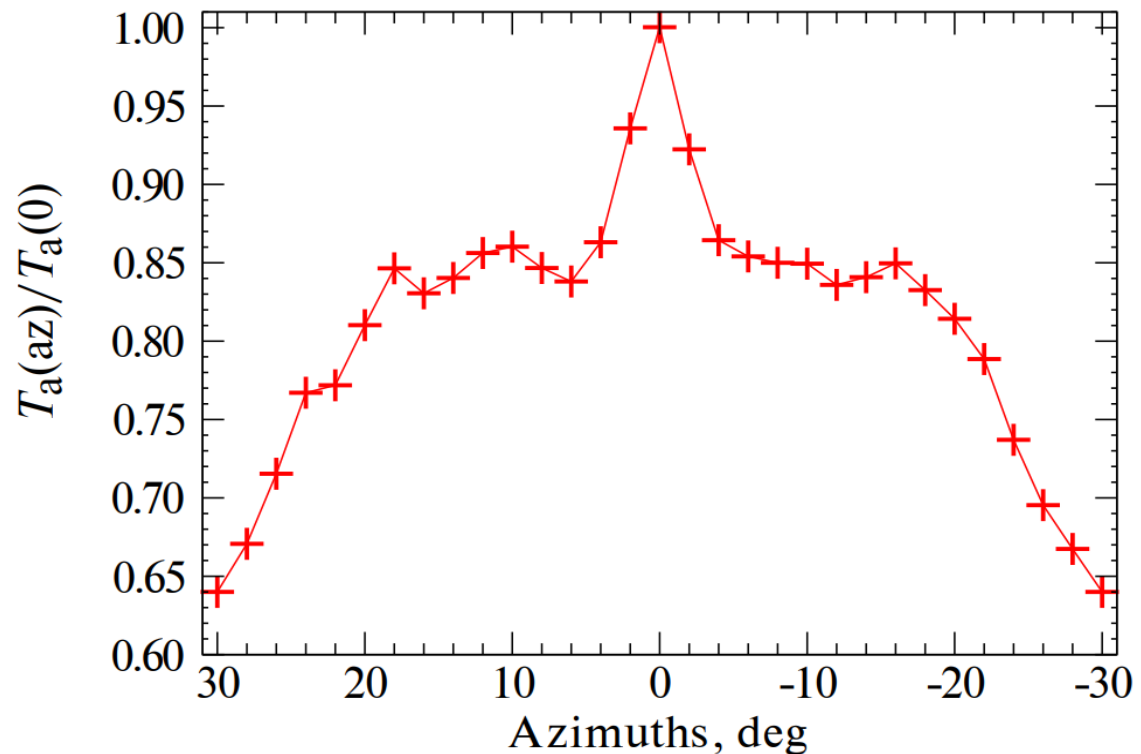
Глава 1. Наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600

Режимы наблюдений

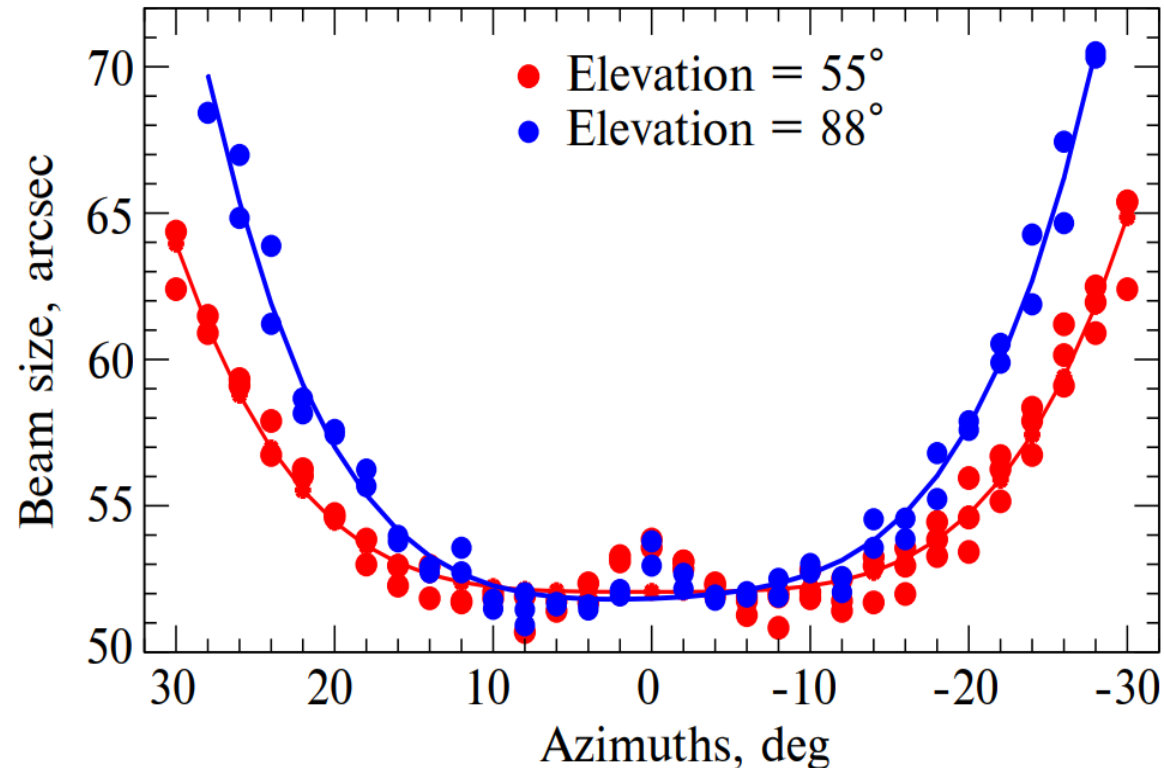


Глава 1. Наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600

Многоазимутальный режим наблюдений



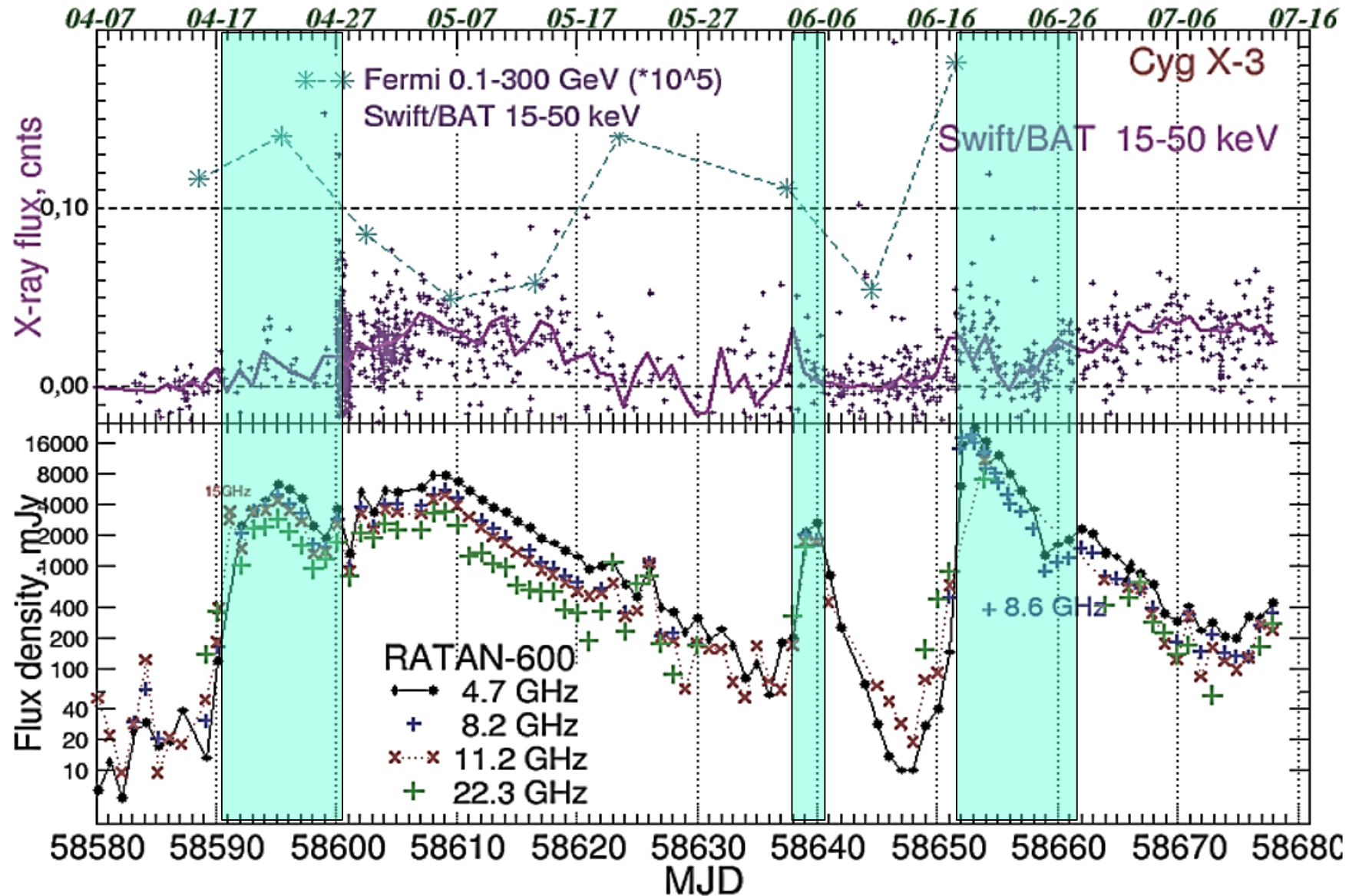
Зависимость нормированных антенных температур источника NGC 7027 от азимута антенной системы “Южный сектор с плоским отражателем”



Размер сечений луча многоазимутальной антенной системы “Южный сектор с плоским отражателем” для источников на двух разных склонениях

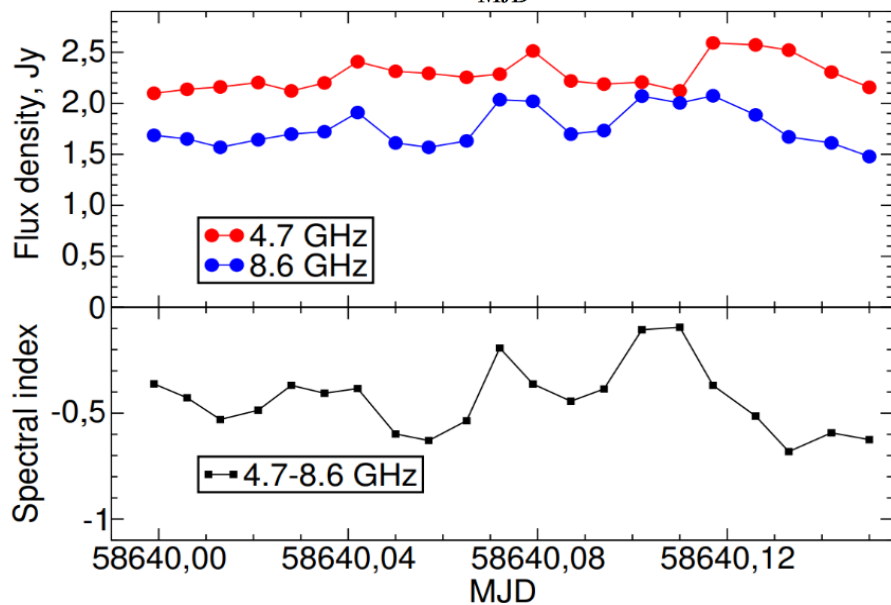
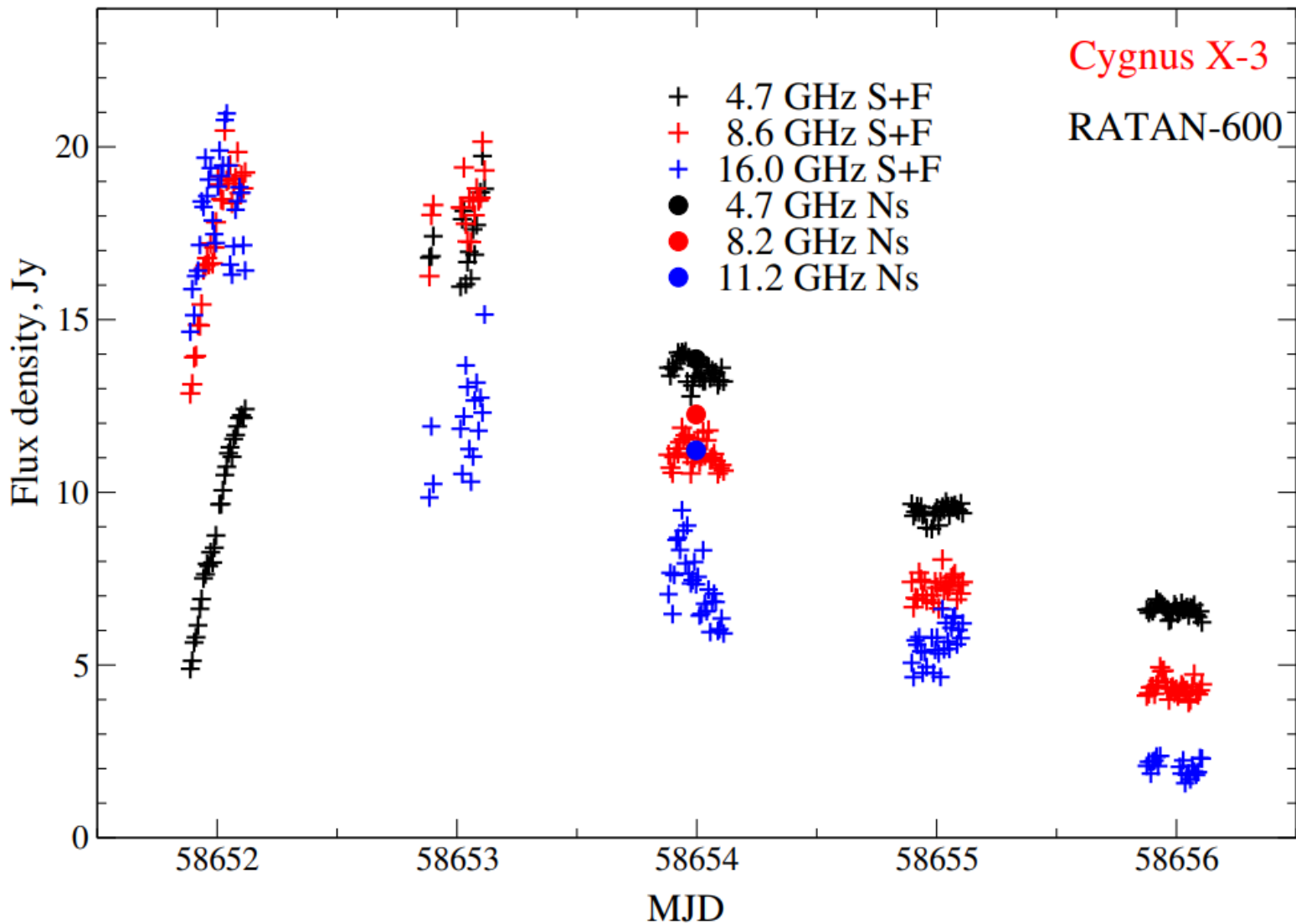
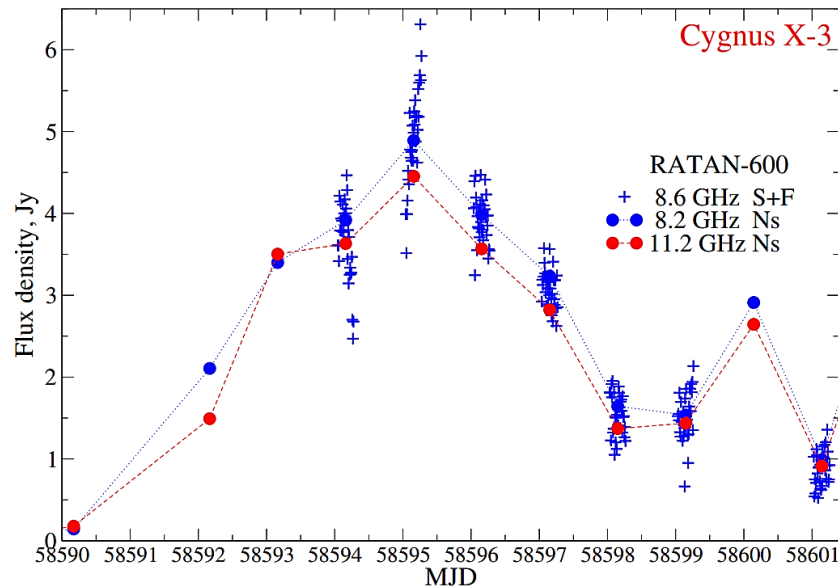
Глава 2. Исследование переменности микроквара Cygnus X-3 в различных диапазонах электромагнитного спектра на разных временных масштабах

Вспышечная активность в период с апреля по июнь 2019 года



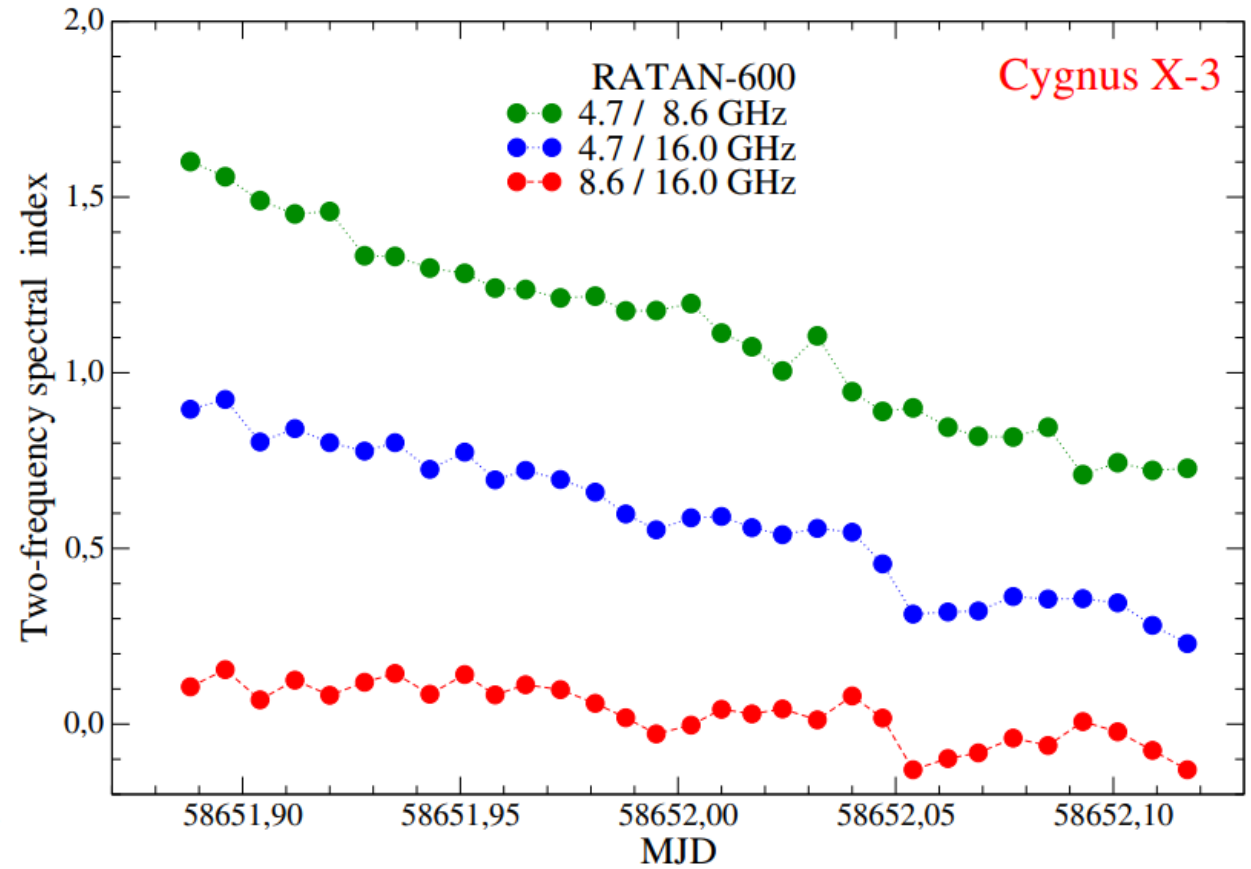
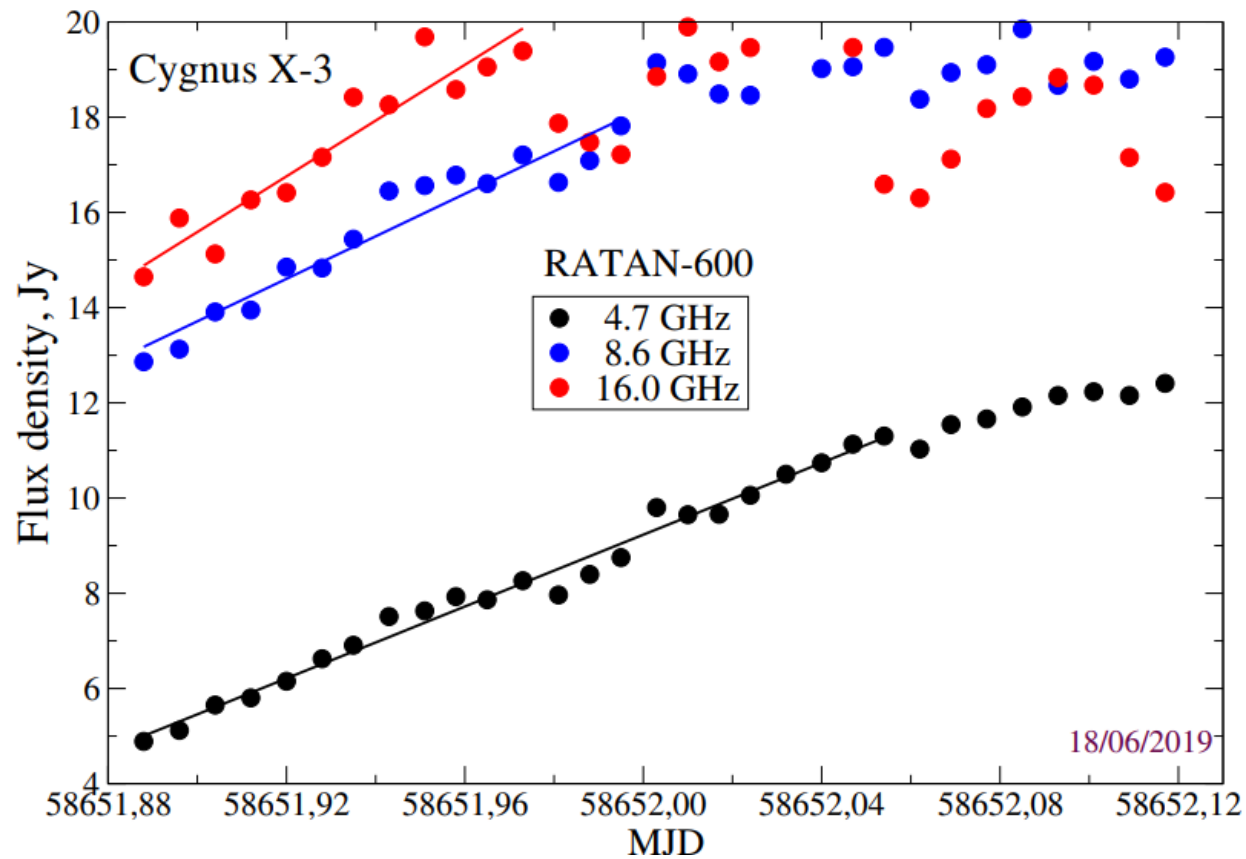
Глава 2. Исследование переменности микрокварара Cygnus X-3 в различных диапазонах электромагнитного спектра на разных временных масштабах

Исследование внутрисуточной переменности в период с апреля по июнь 2019 года



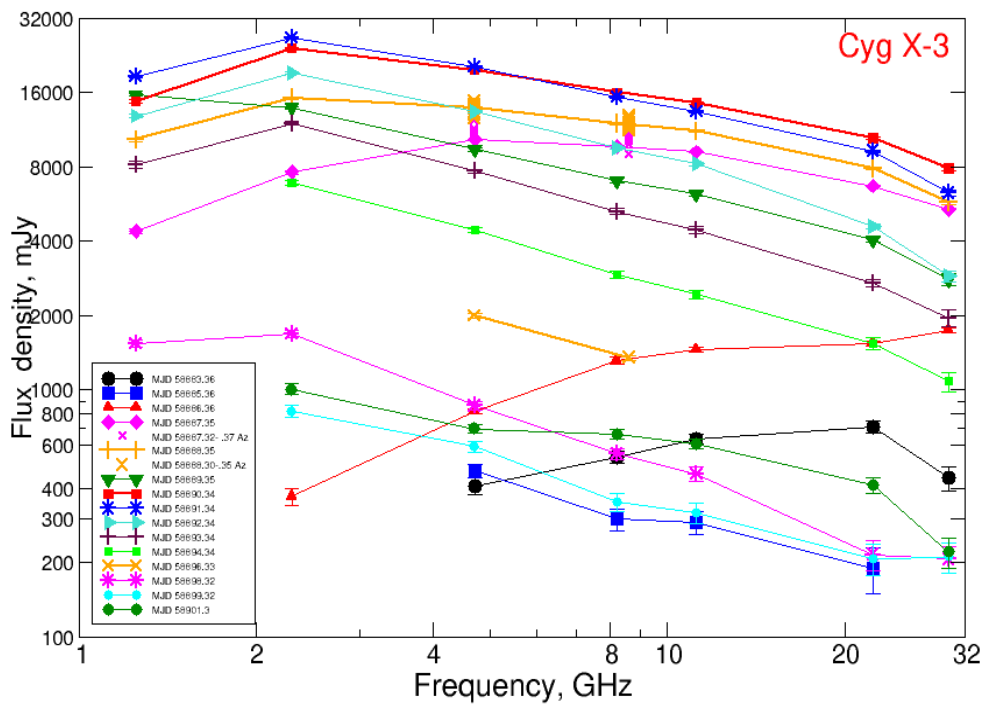
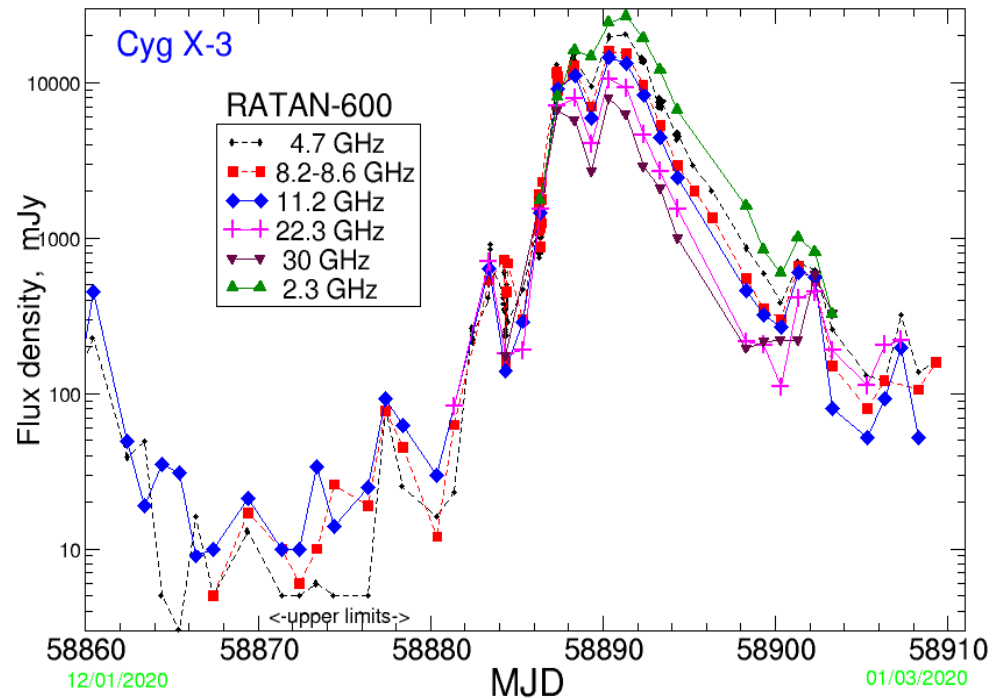
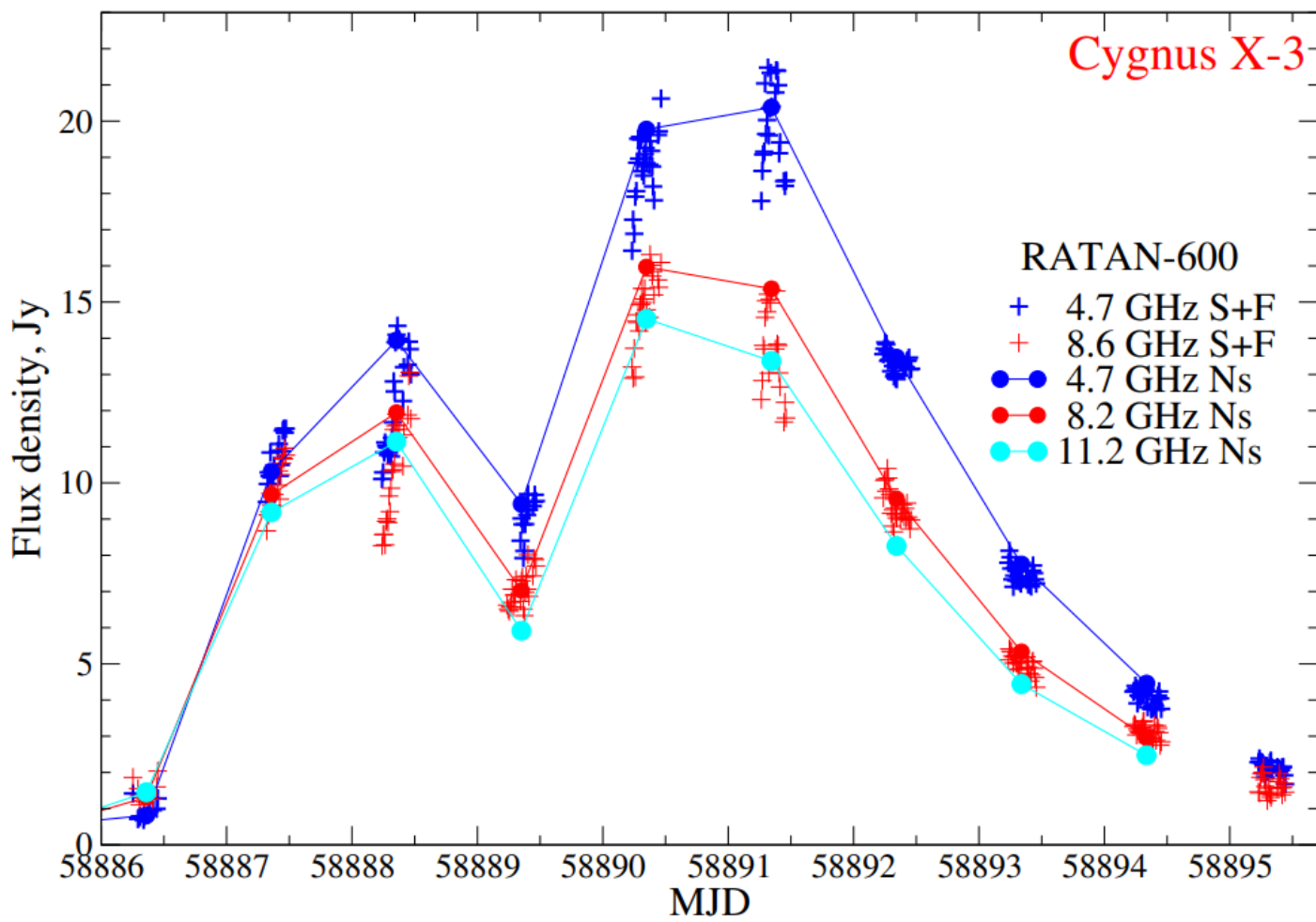
Глава 2. Исследование переменности микроквазара Cygnus X-3 в различных диапазонах электромагнитного спектра на разных временных масштабах

Анализ внутрисуточной переменности синхротронного радиоизлучения на начальной фазе формирования струйных выбросов



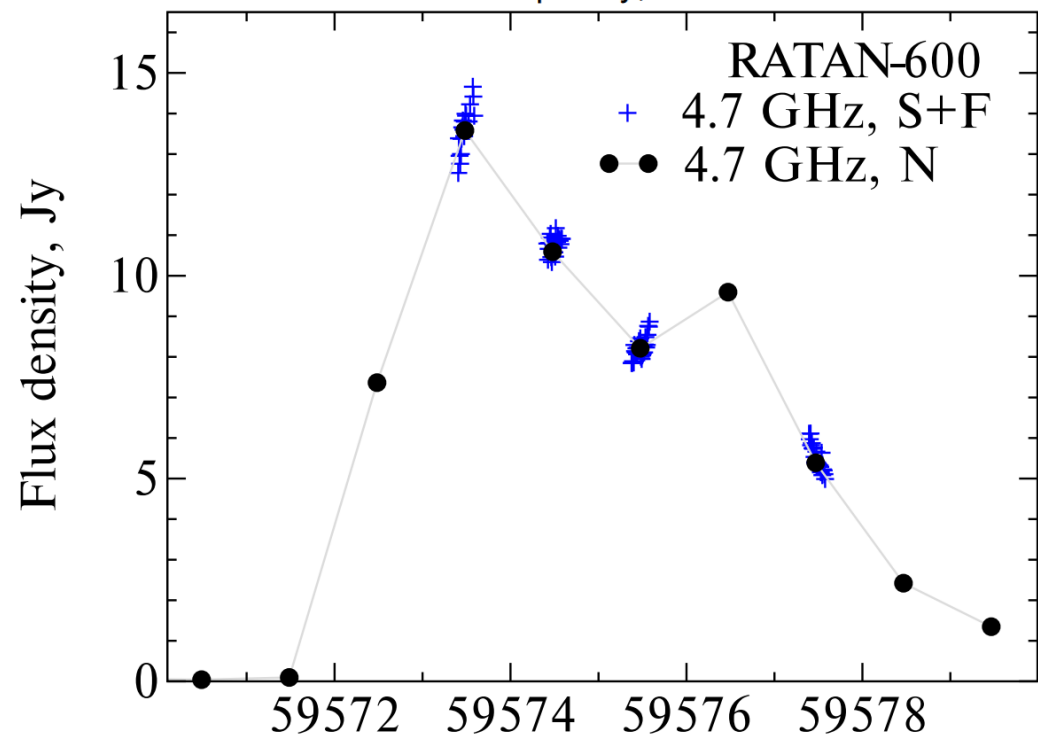
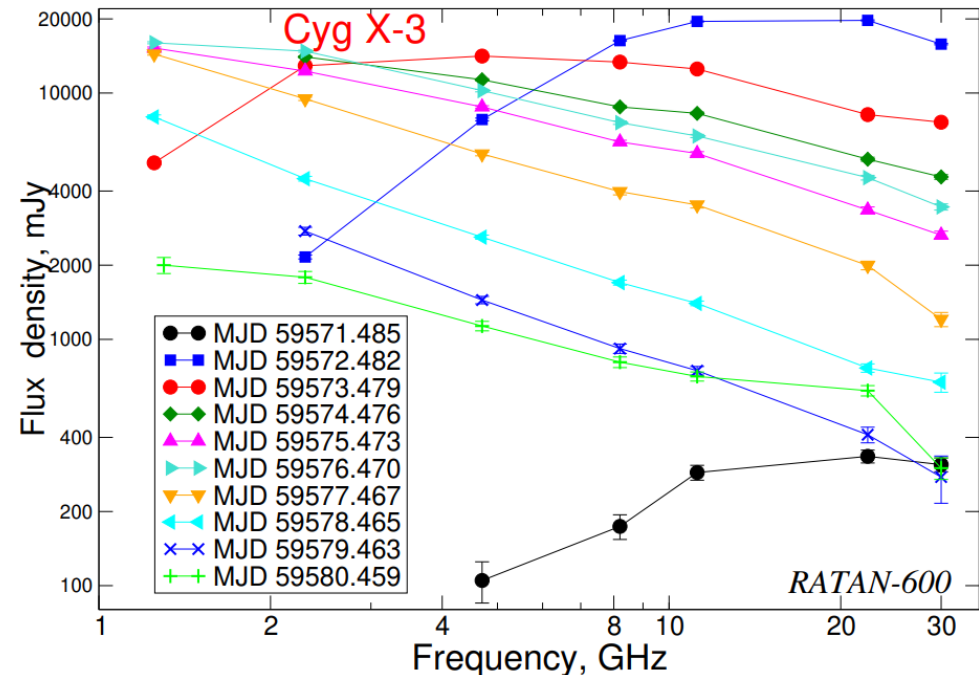
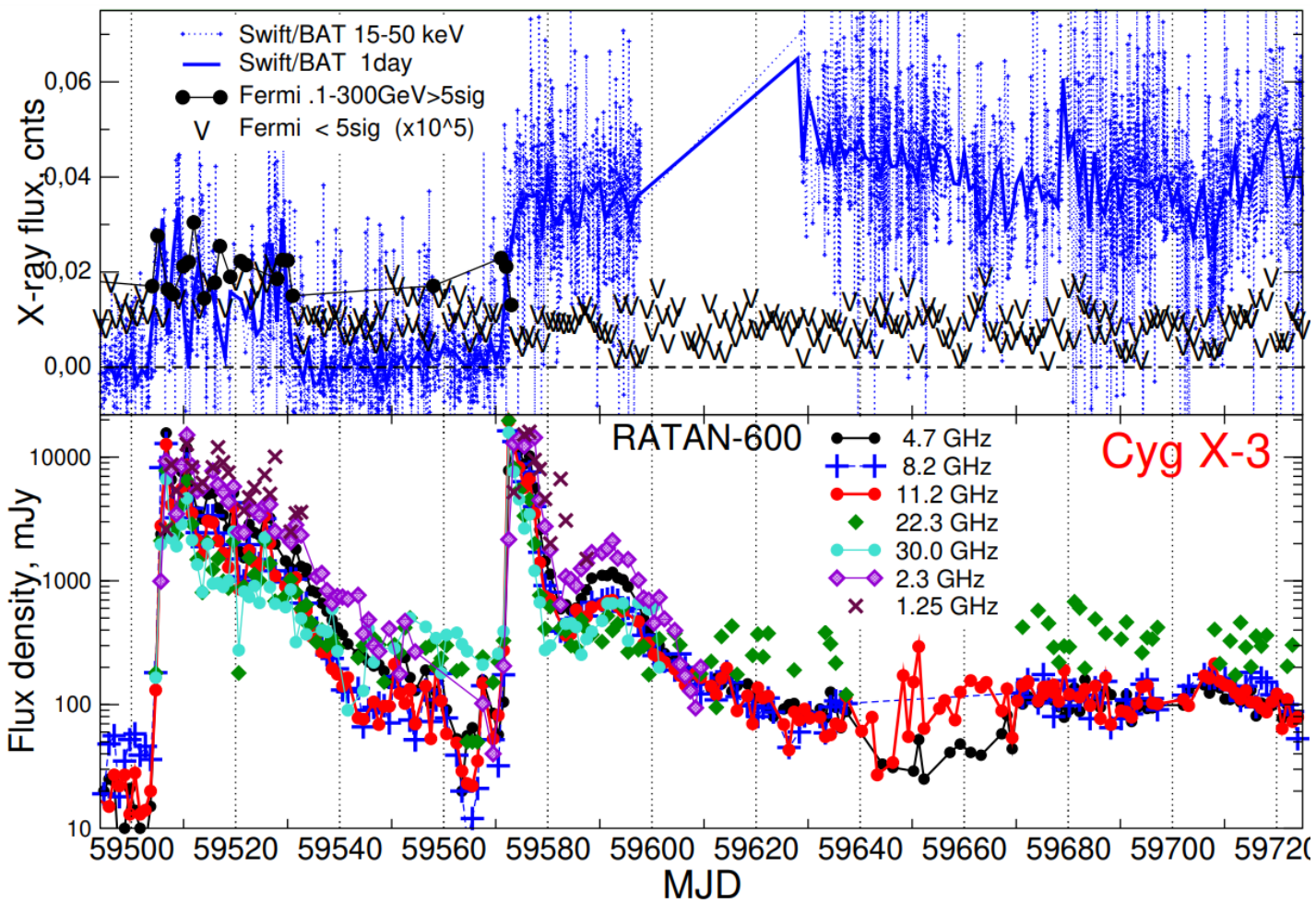
Глава 2. Исследование переменности микроквазара Cygnus X-3 в различных диапазонах электромагнитного спектра на разных временных масштабах

Вспышечная активность в феврале 2020 года

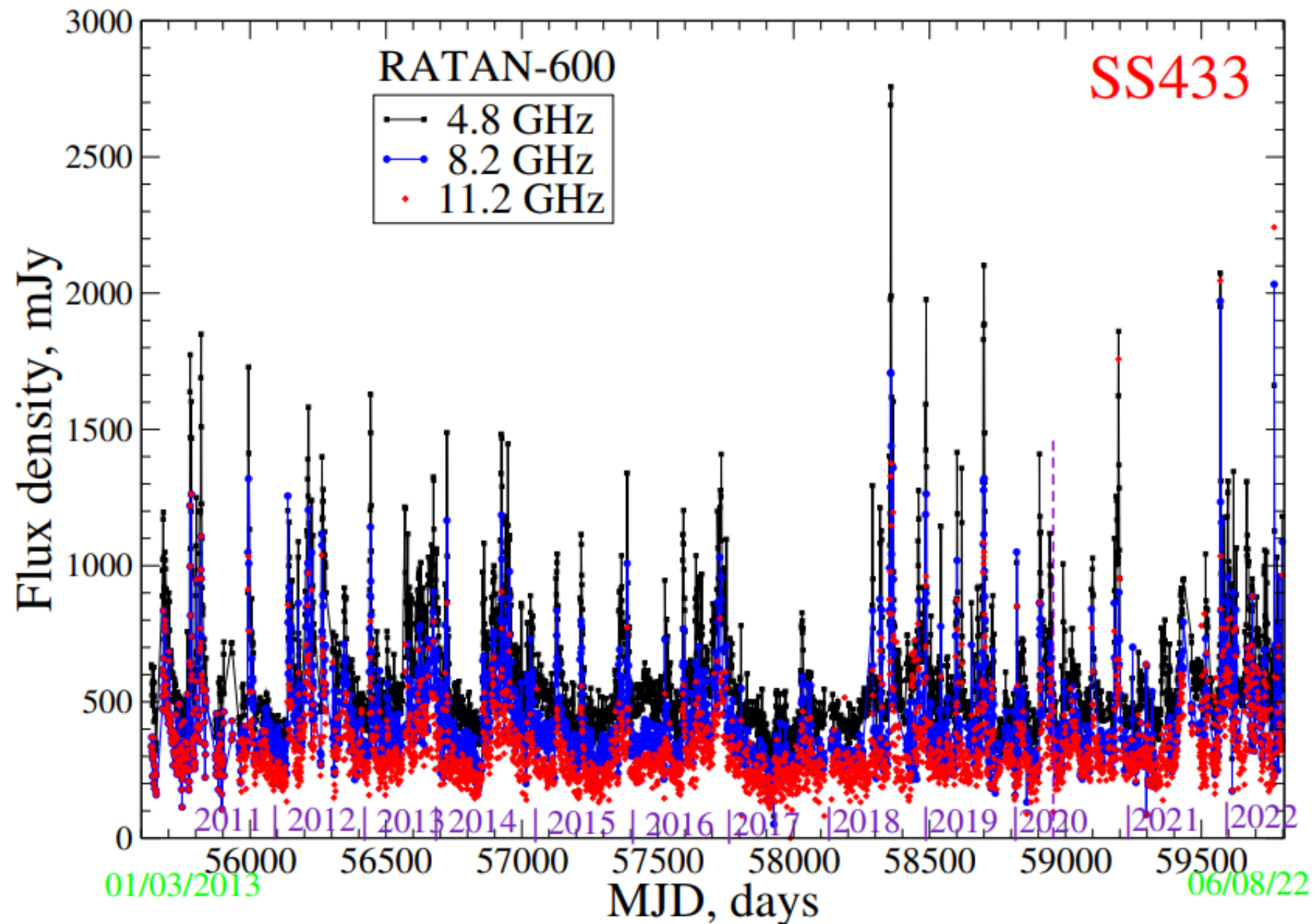


Глава 2. Исследование переменности микроквара Cygnus X-3 в различных диапазонах электромагнитного спектра на разных временных масштабах

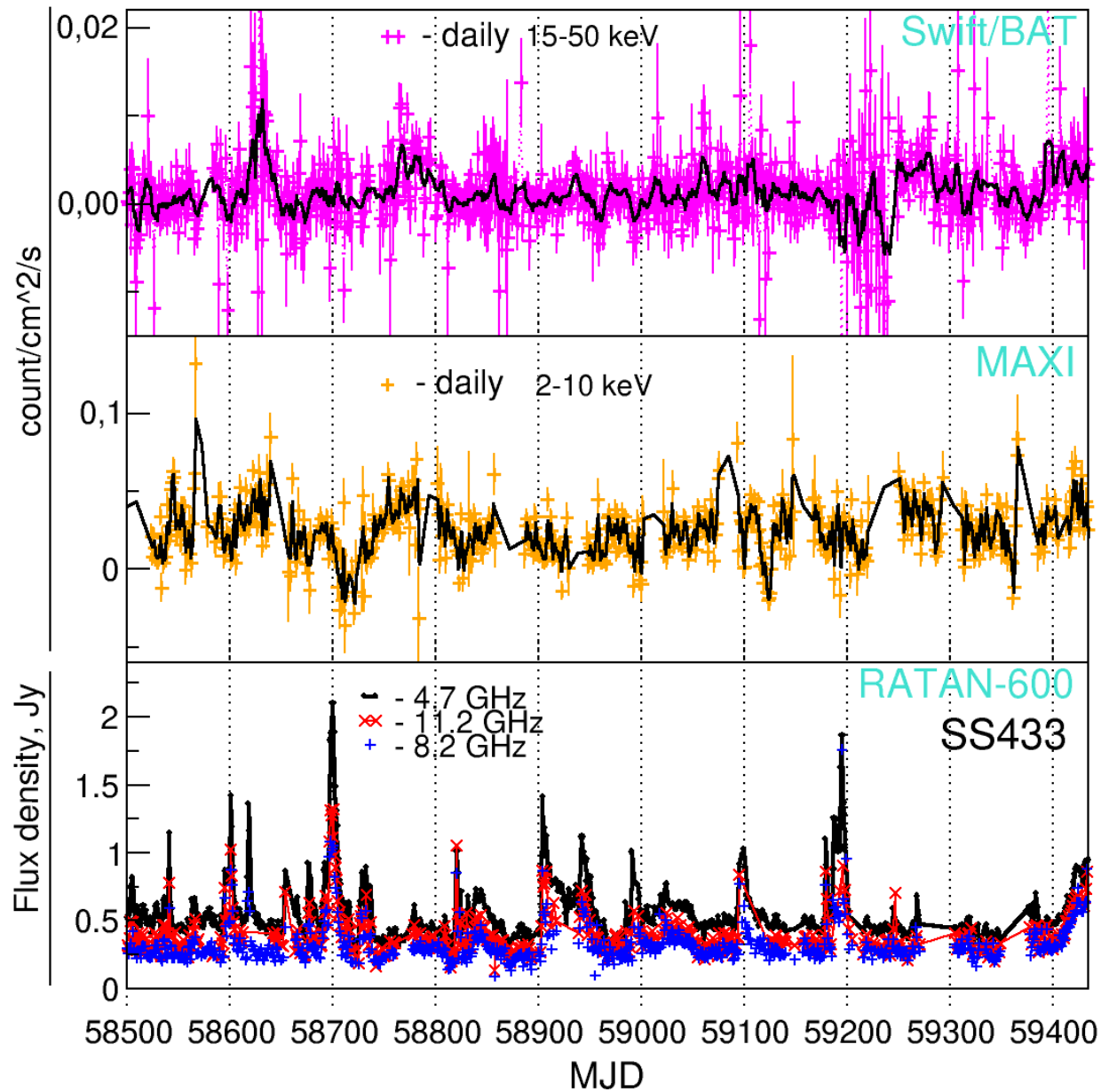
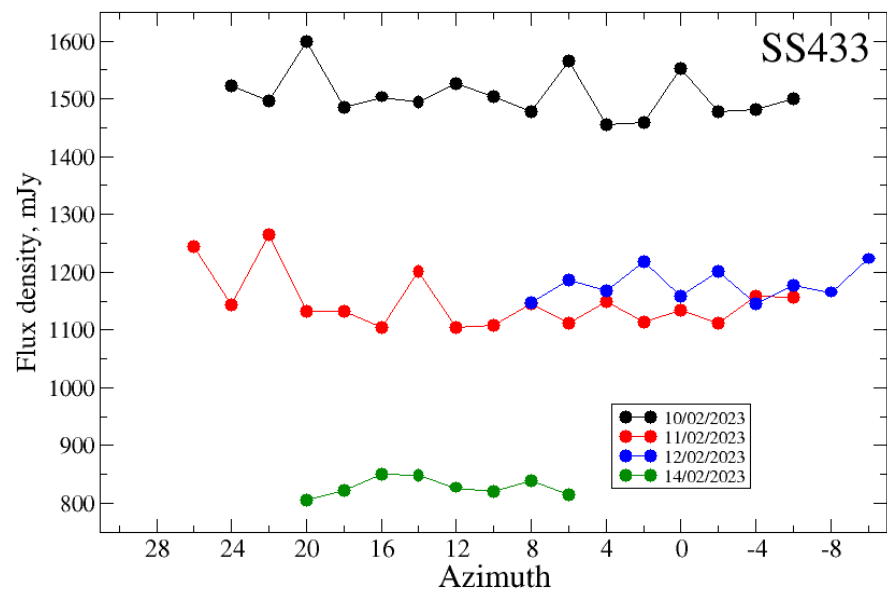
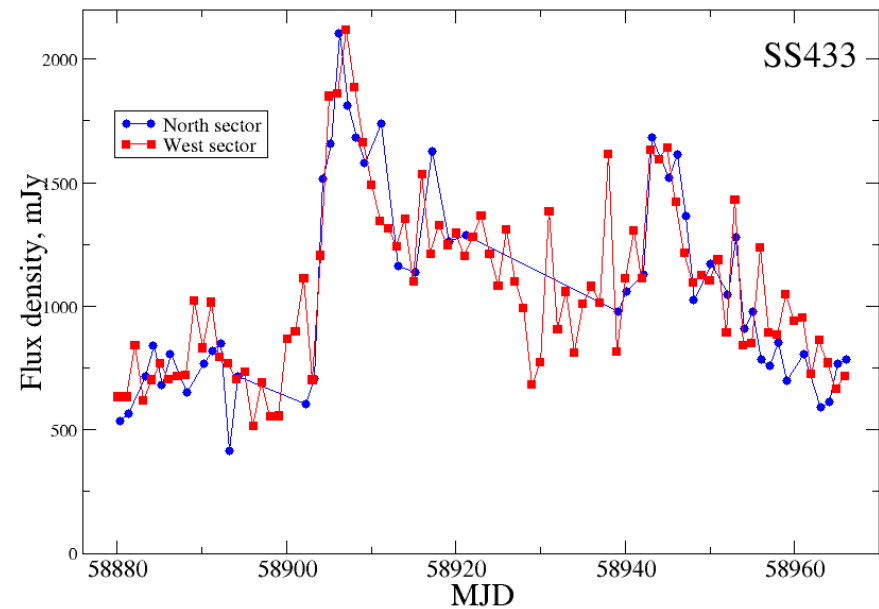
Вспышечная активность в период с октября 2021
по январь 2022 года

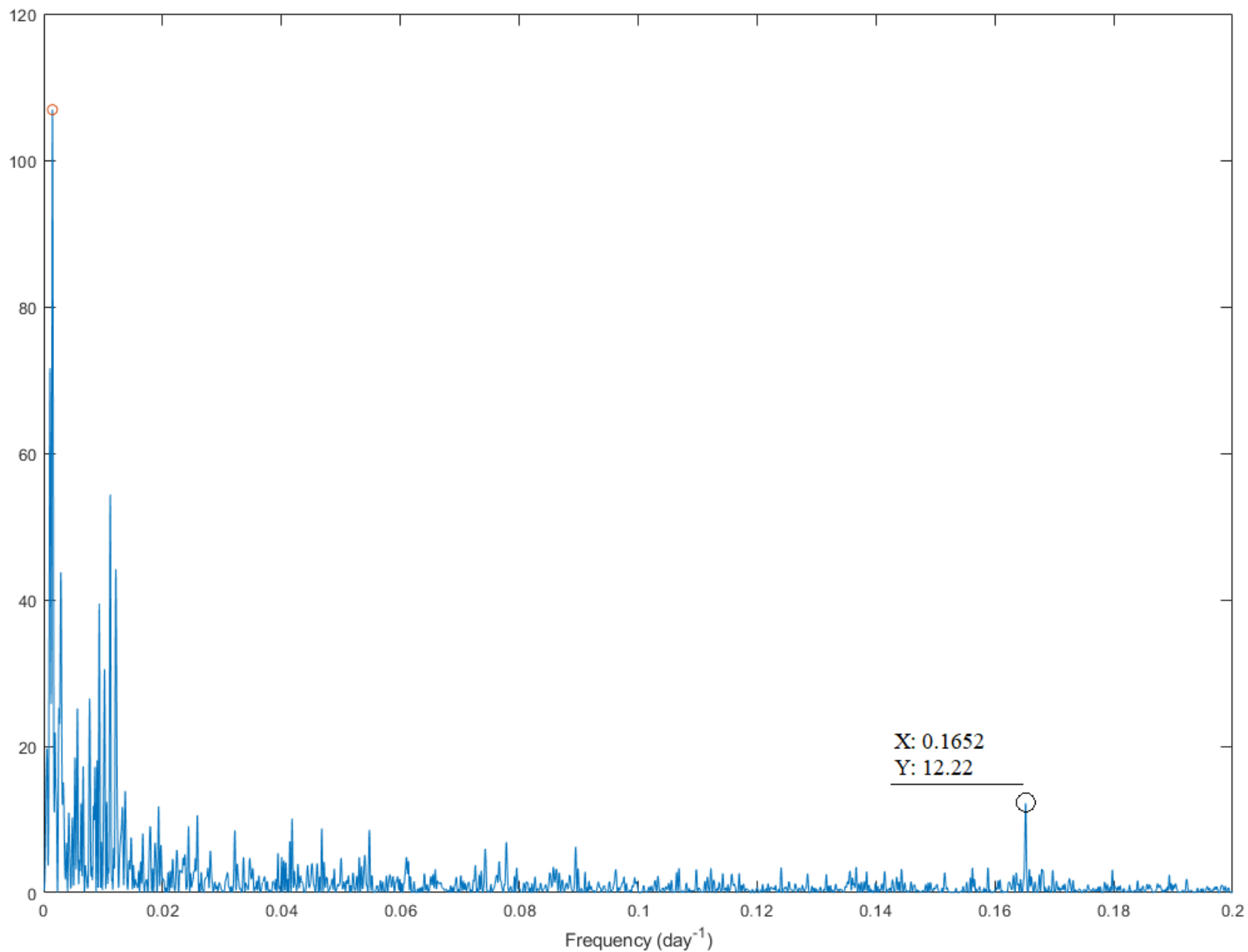


Глава 3. Результаты мониторинга вспышечной активности микроквара SS443 в радиодиапазоне



Глава 3. Результаты мониторинга вспышечной активности микроквара SS443 в радиодиапазоне





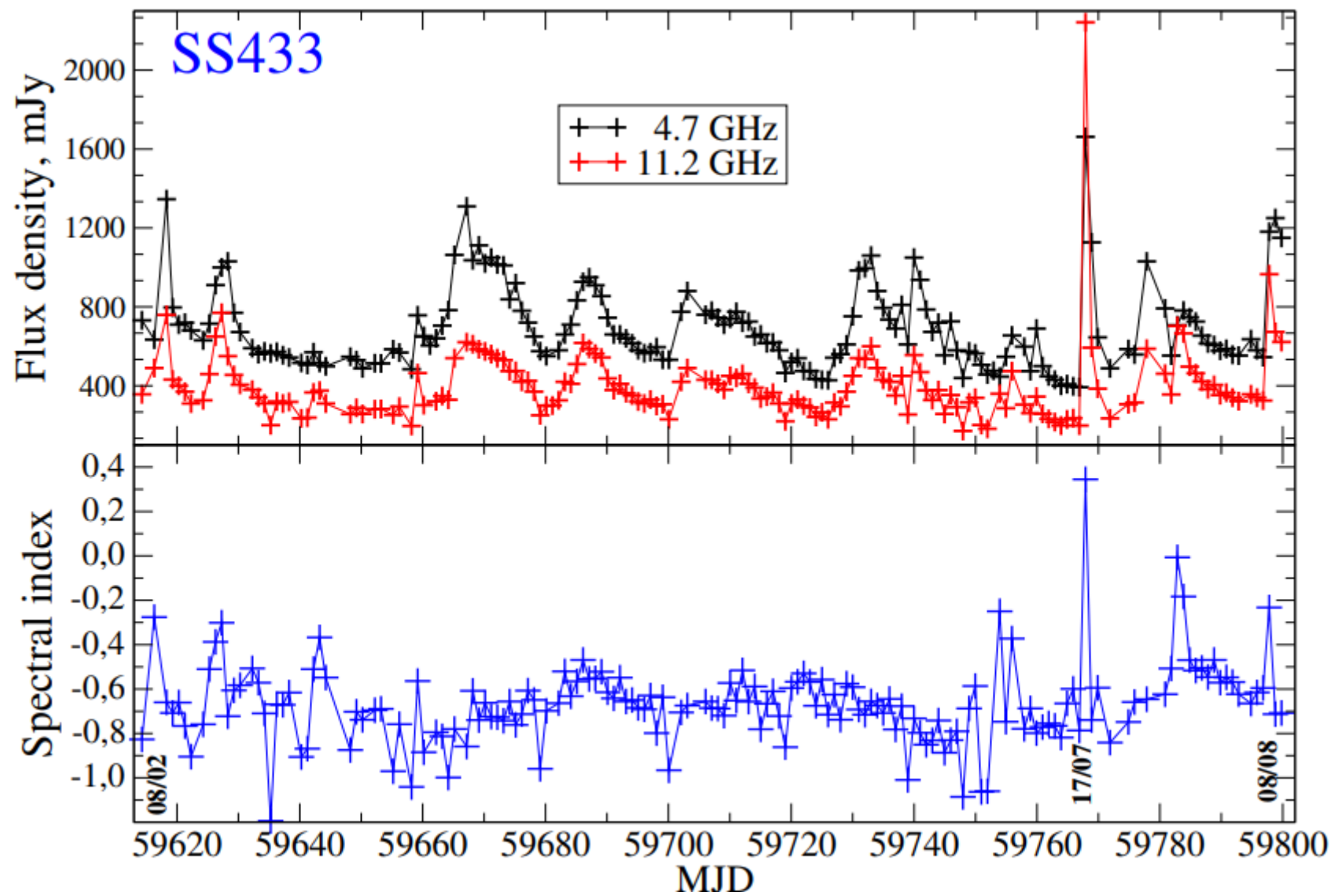
На частоте 4.7 ГГц

$$\nu = 0.1652 \text{d}^{-1} \quad P = \mathbf{6.0532}$$

$$2/162.5 + 2/13.081 = 0.1652$$

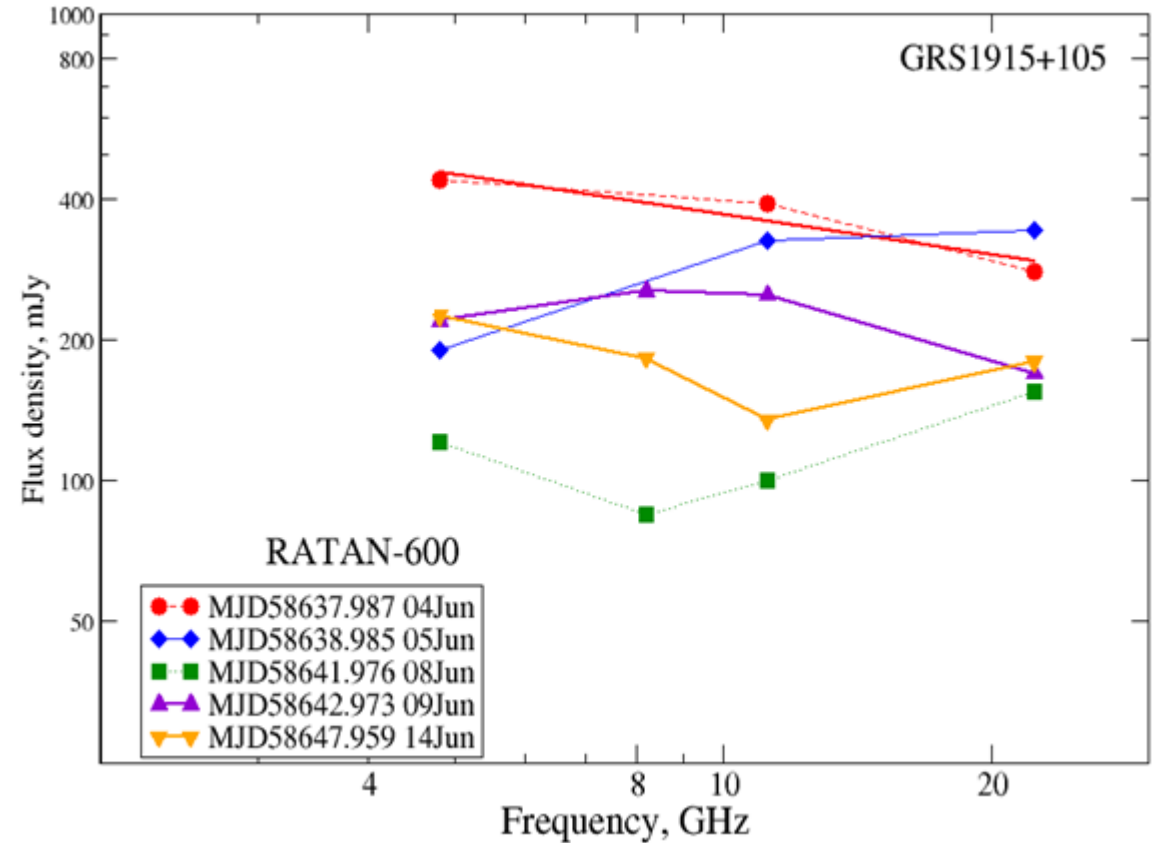
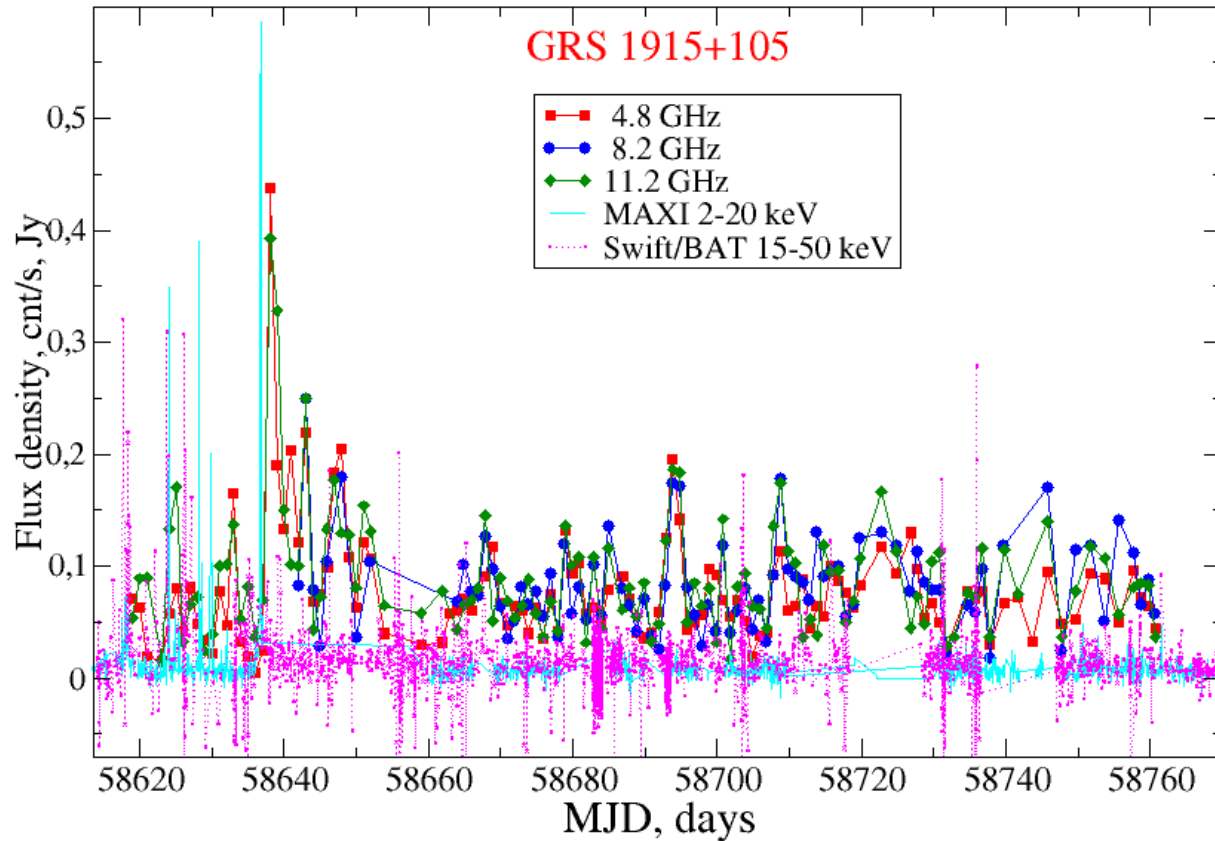
$$1/0.1652 = \mathbf{6.0532}$$

Глава 3. Результаты мониторинга вспышечной активности микроквара SS443 в радиодиапазоне



Глава 4. Исследование вспышечных событий в микроквазаре GRS 1915+105

Начало длительной серии струйных выбросов в июне 2019 года

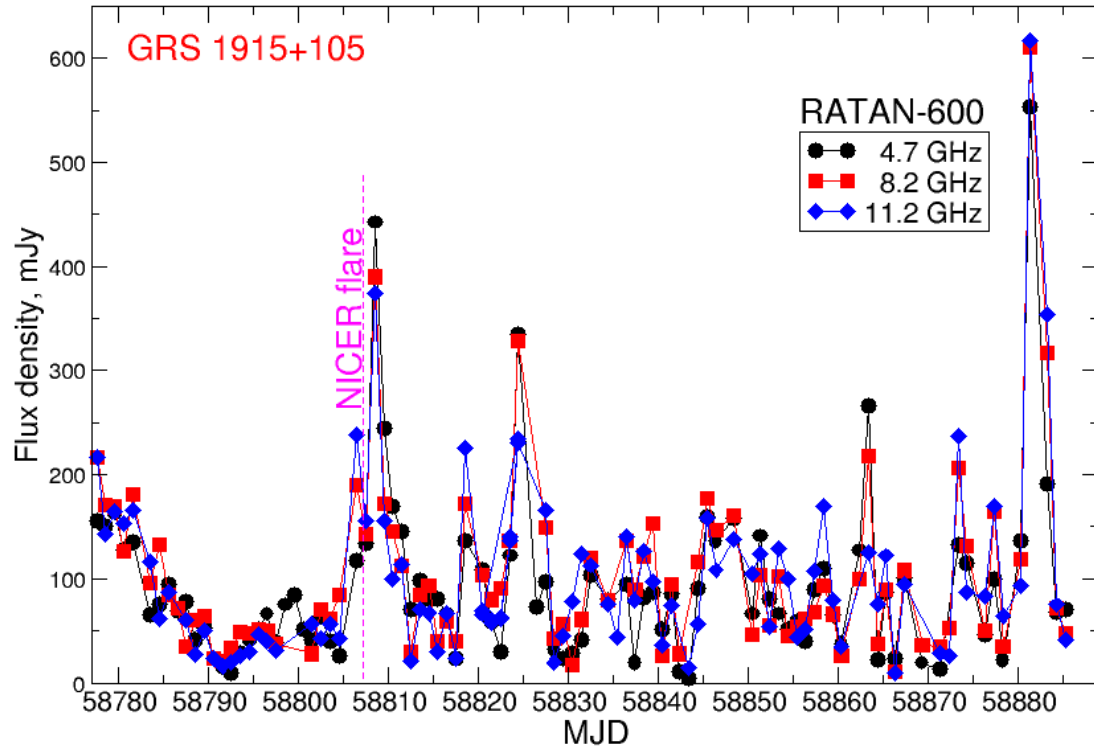


«RATAN-600 multi-frequency measurements of GRS1915+105»

S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, P. G. Tsybulev, N. N. Bursov, A. V. Shevchenko, 2019.

Глава 4. Исследование вспышечных событий в микроквазаре GRS 1915+105

ноябрь 2019 - февраль 2020

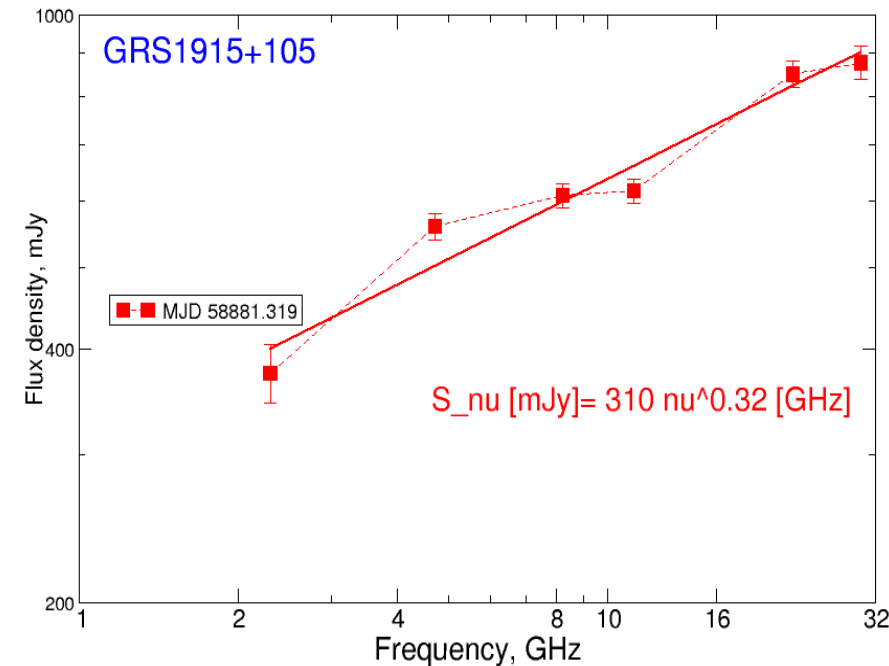
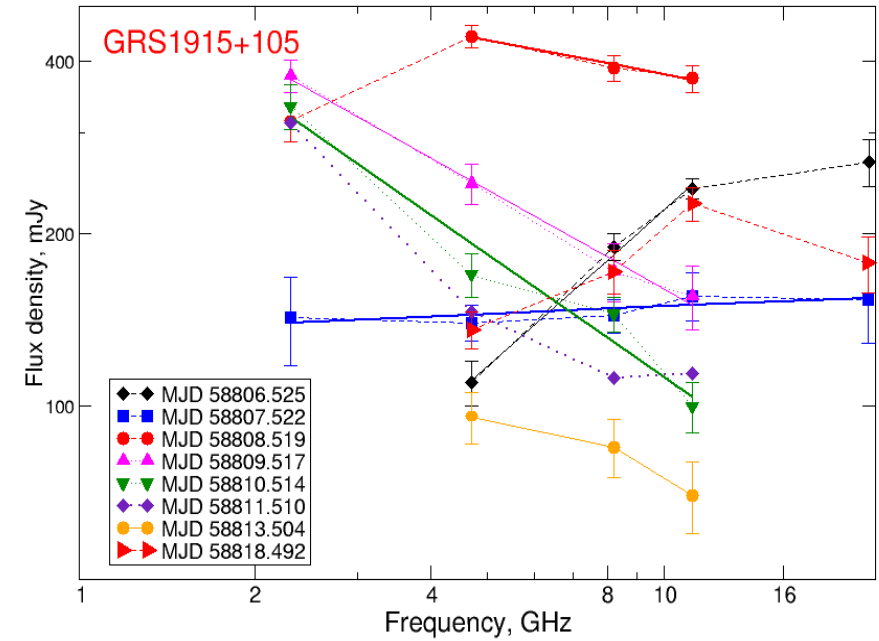


«New bright radio flare of GRS 1915+105»

S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, P. G. Tsybulev, N. N. Bursov, A. V. Shevchenko, 2019.

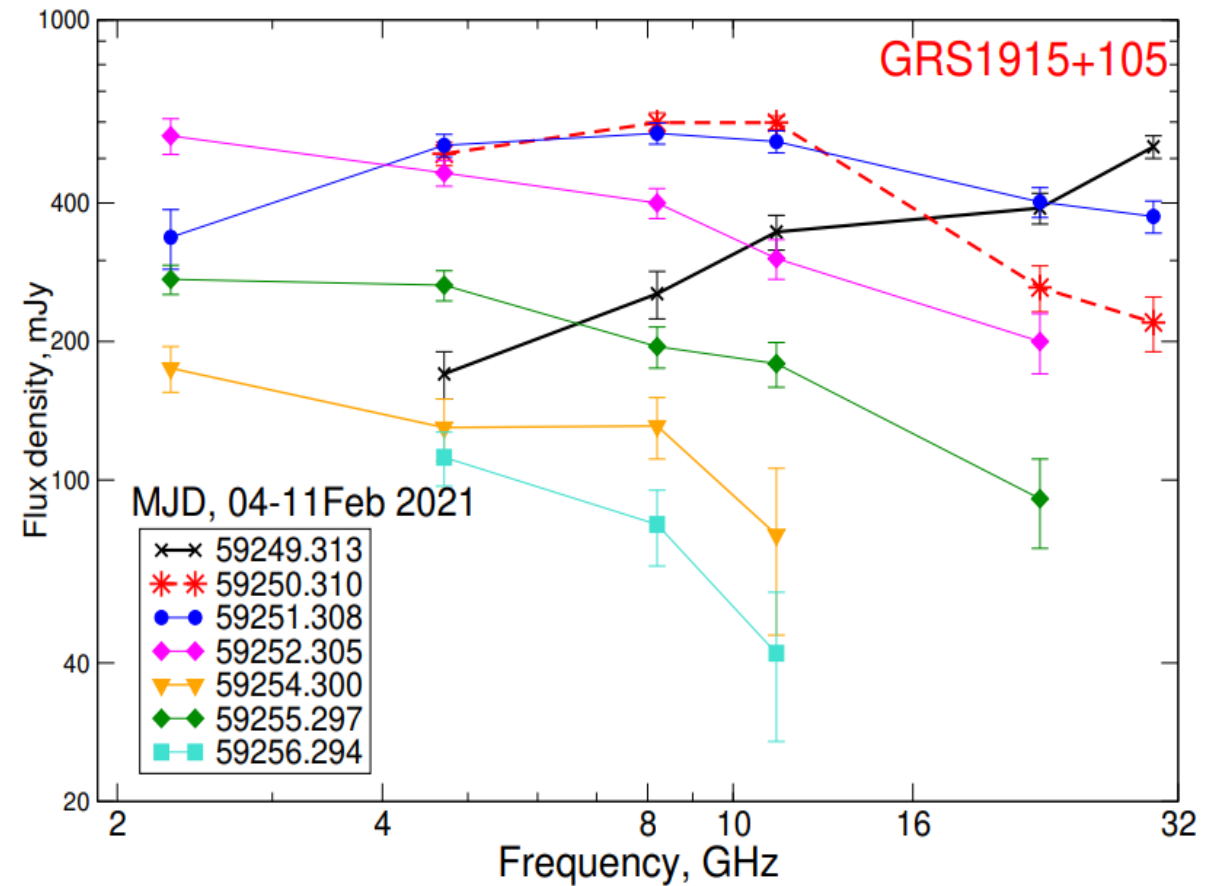
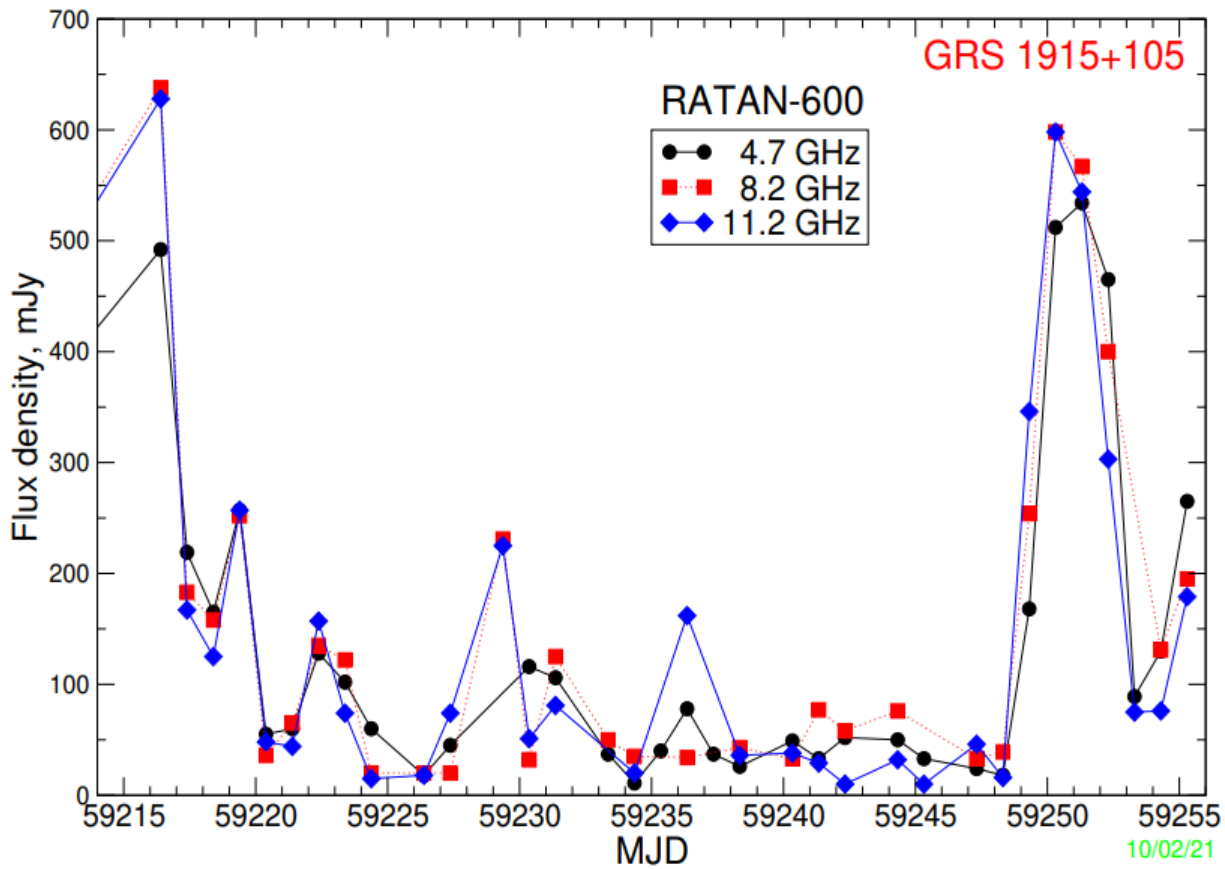
«Most bright radio flare of GRS 1915+105 for last decade»

S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, P. G. Tsybulev, N. N. Bursov, A. V. Shevchenko, 2020.



Глава 4. Исследование вспышечных событий в микроквазаре GRS 1915+105

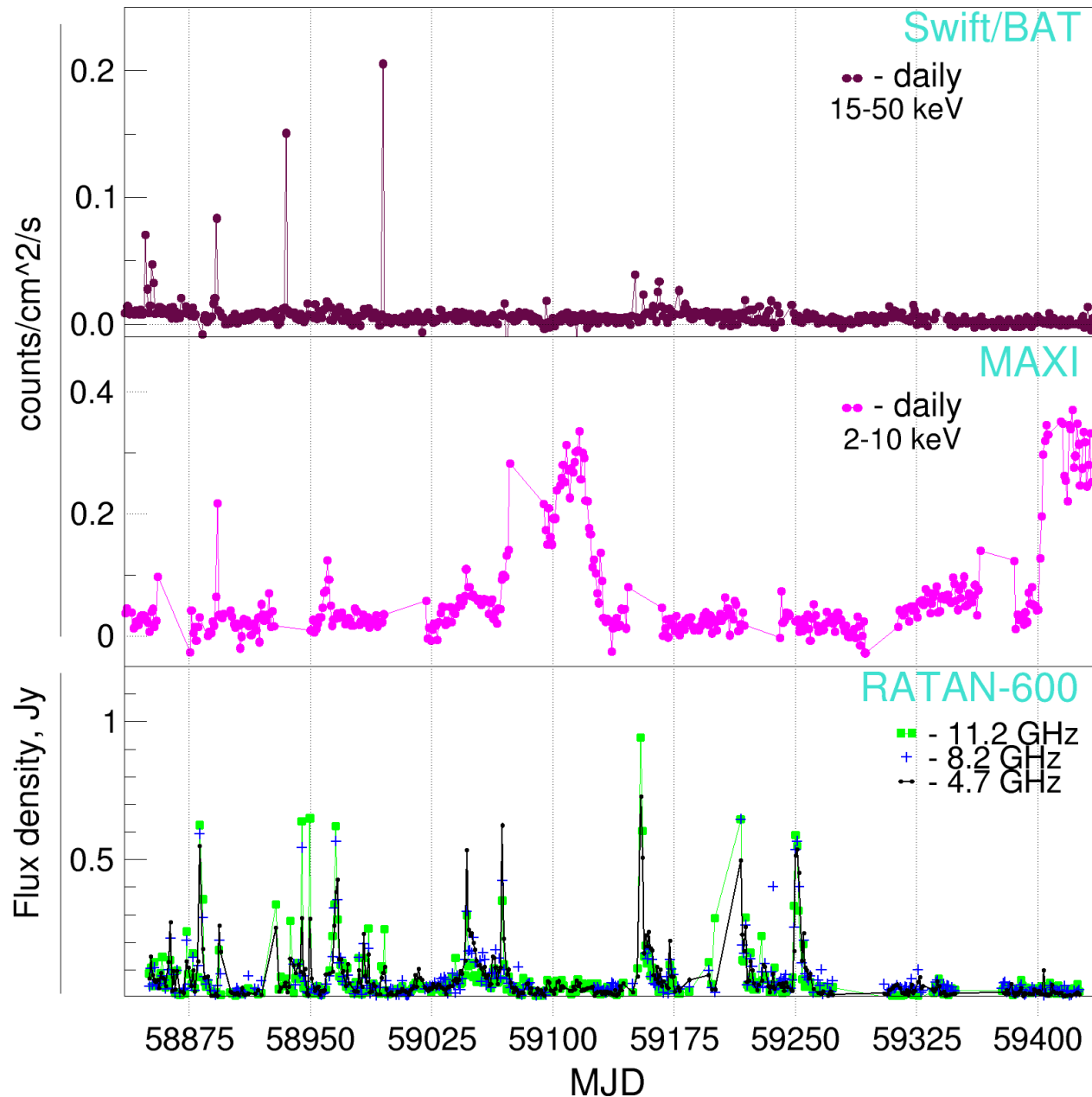
январь 2021 - февраль 2021



«The history of long-term studies of Galactic X-ray binaries with jet emissions with RATAN-600».

Trushkin, S. A.; Shevchenko, A. V.; Bursov, N. N.; Tsybulev, P. G.; Nizhelsky, N.

Глава 4. Исследование вспышечных событий в микроквазаре GRS 1915+105

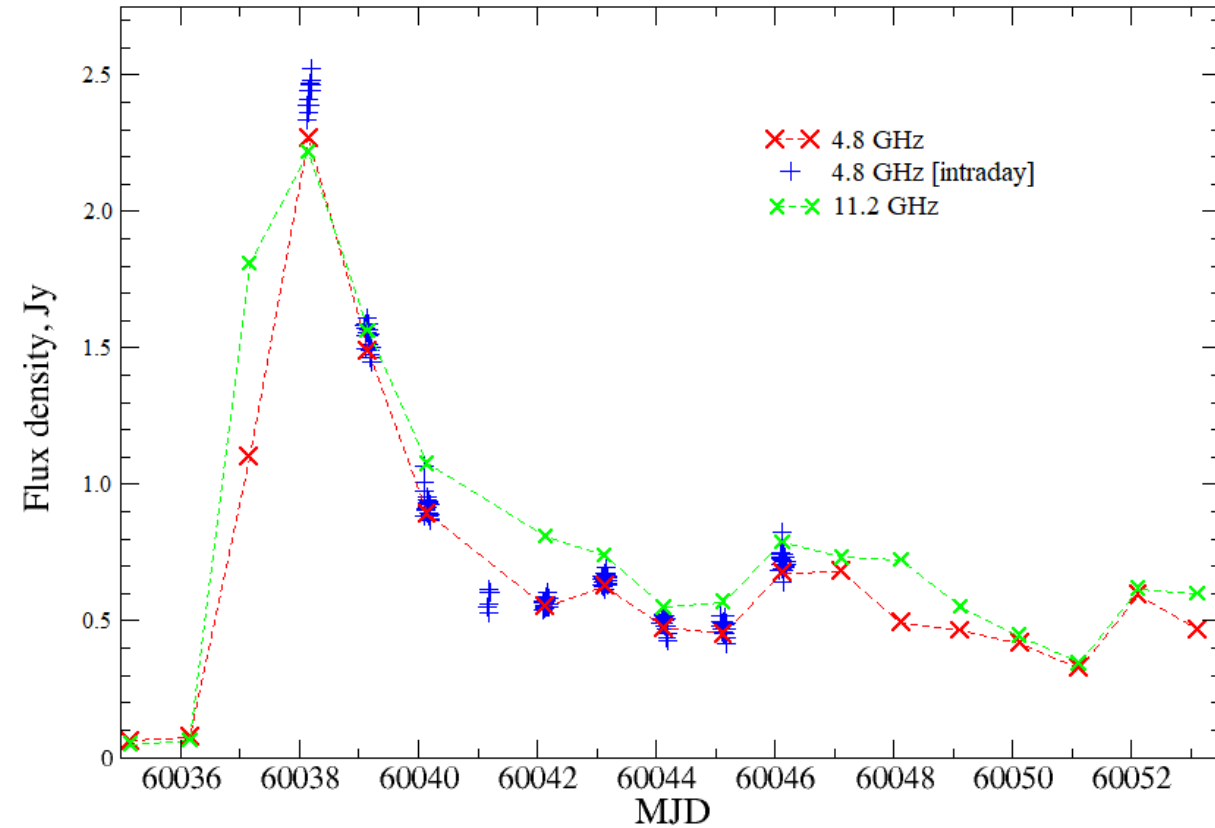
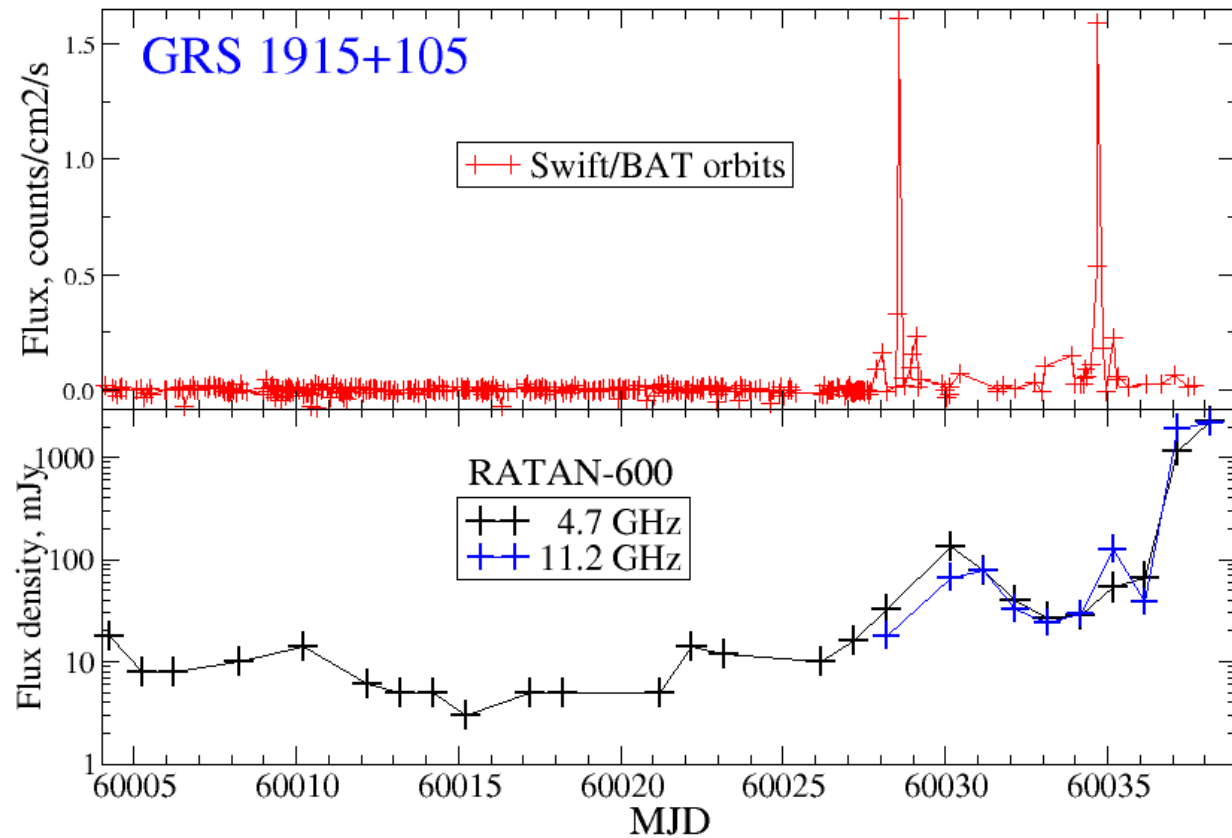


«Monitoring of Microquasars with RATAN-600».

Trushkin, S.; Shevchenko, A.; Bursov, N.; Nizhelskii, N.; Tsybulev, P.; Borisov, A.; Kudryashova, A., 2020, p. 351-354

Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proceedings of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020 in Nizhny Arkhyz, Russia.

Глава 4. Исследование вспышечных событий в микроквазаре GRS 1915+105

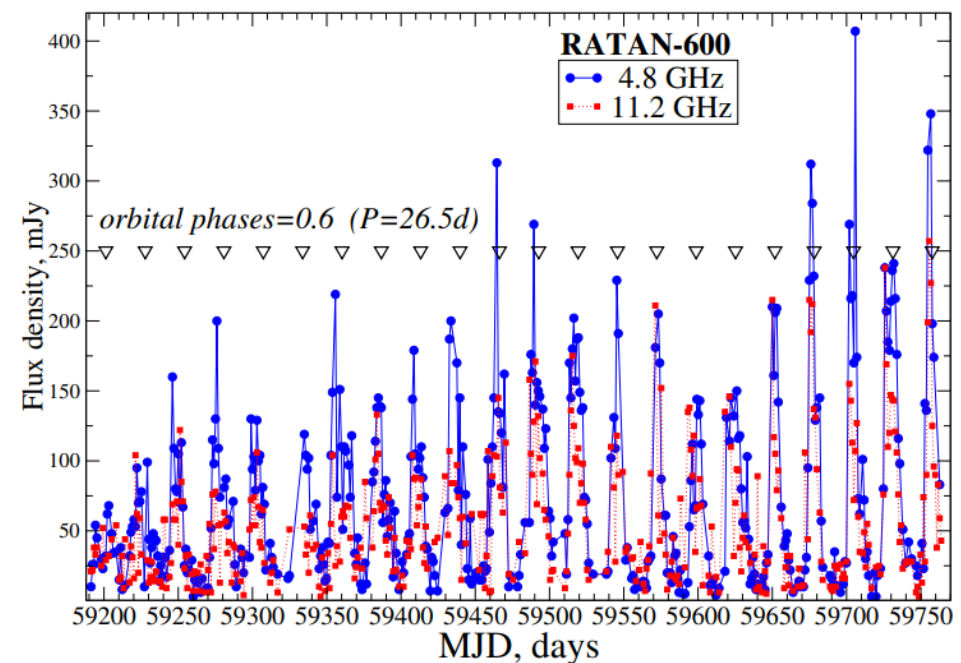
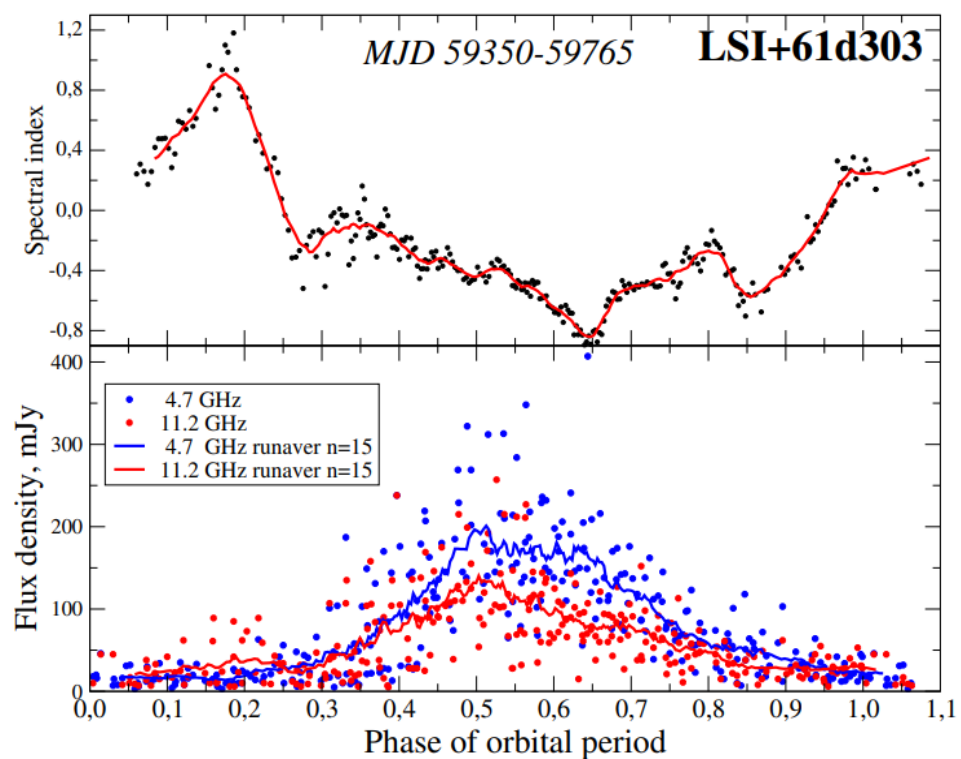
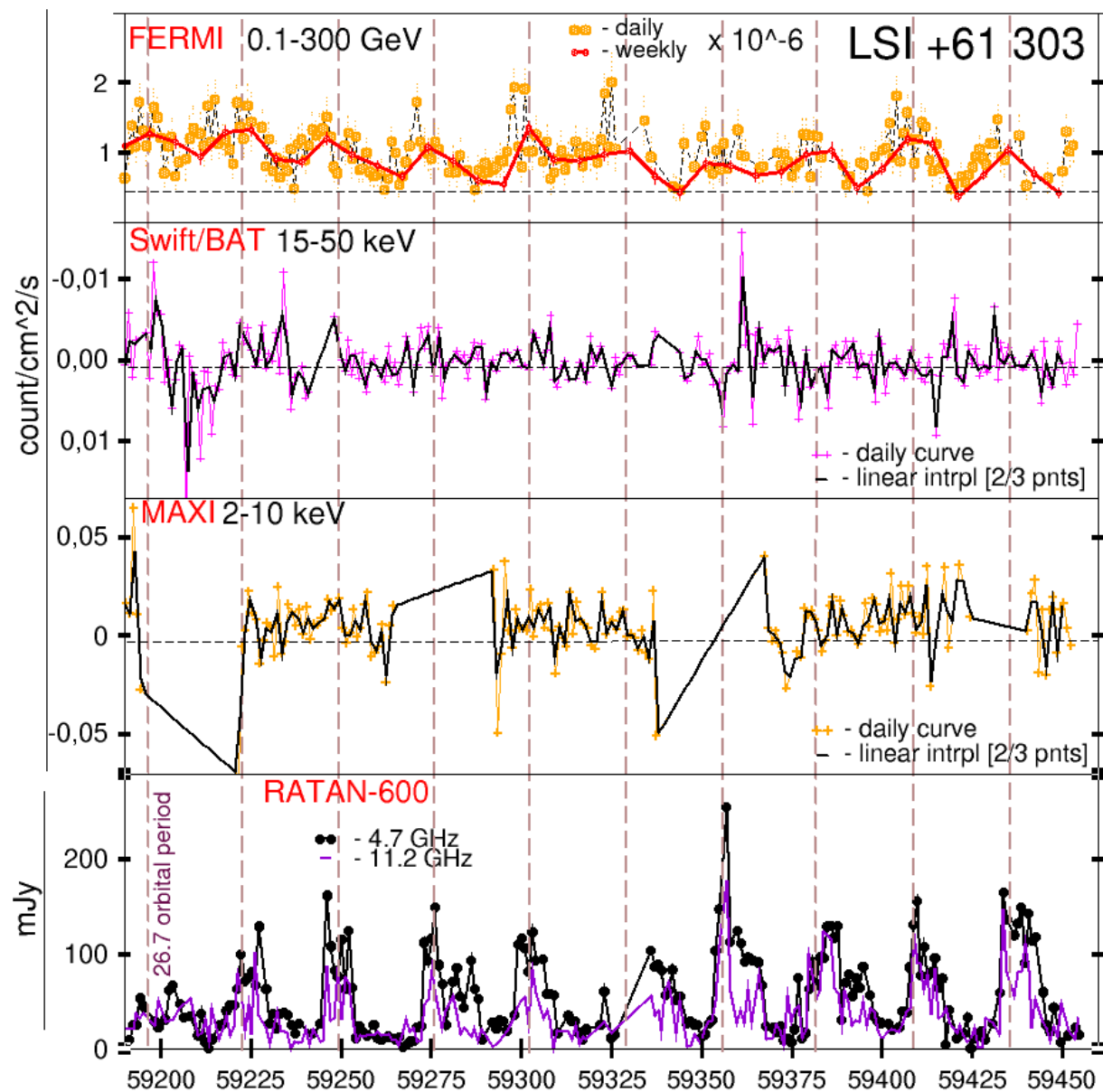


«New short-time radio and X-ray flare from GRS1915+105» Trushkin, S.A.; Nizhelskij, N.A.; Tsybulev, P.G.; Shevchenko, A.V., 2023

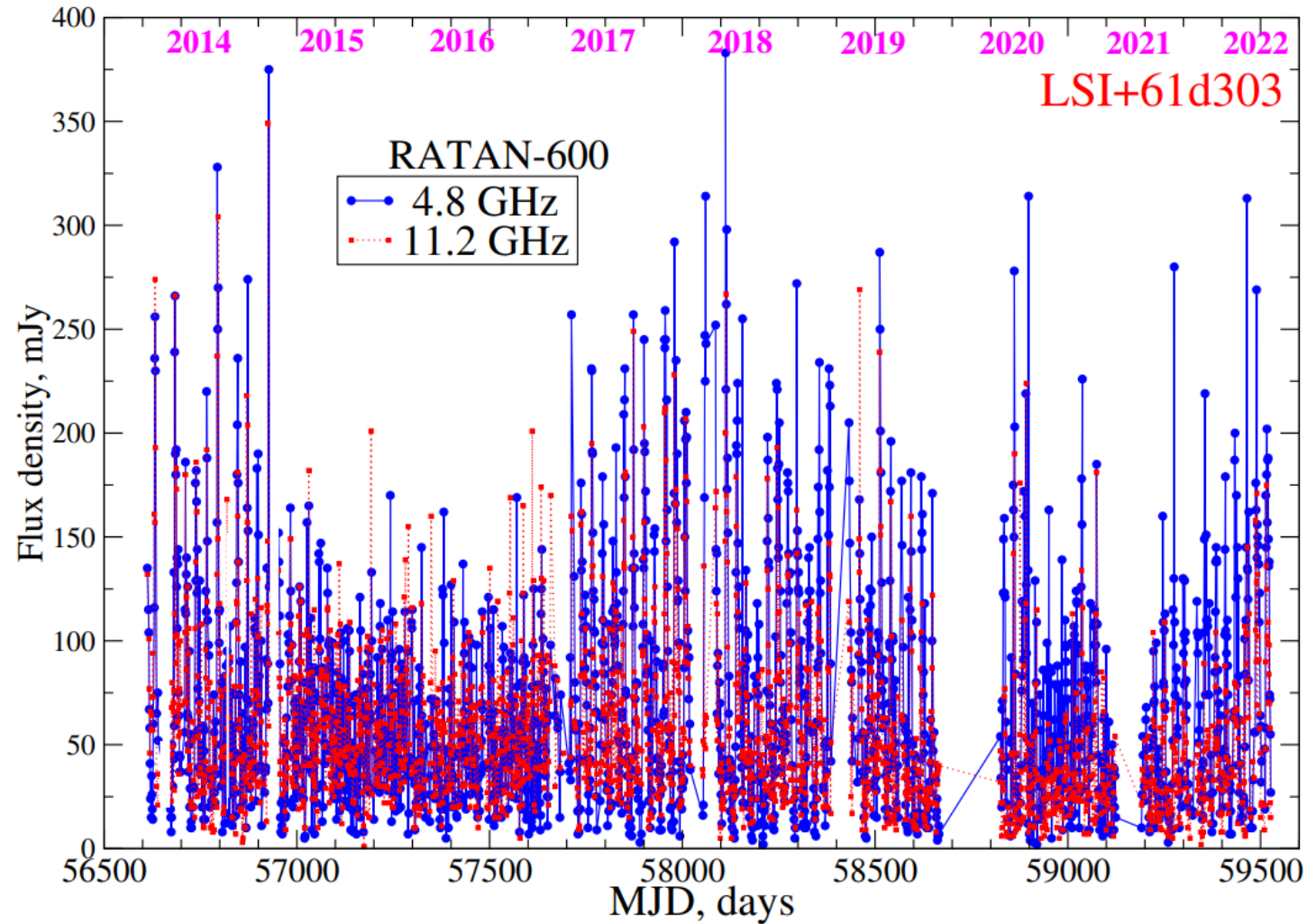
«Giant radio flare from GRS1915+105»

Trushkin, S. A.; Nizhelskij, N. A.; Tsybulev, P. G.; Shevchenko, A.V., 2023

Глава 5. Анализ переменности и поиск периодичности в кривых блеска микроквара LSI+61d303



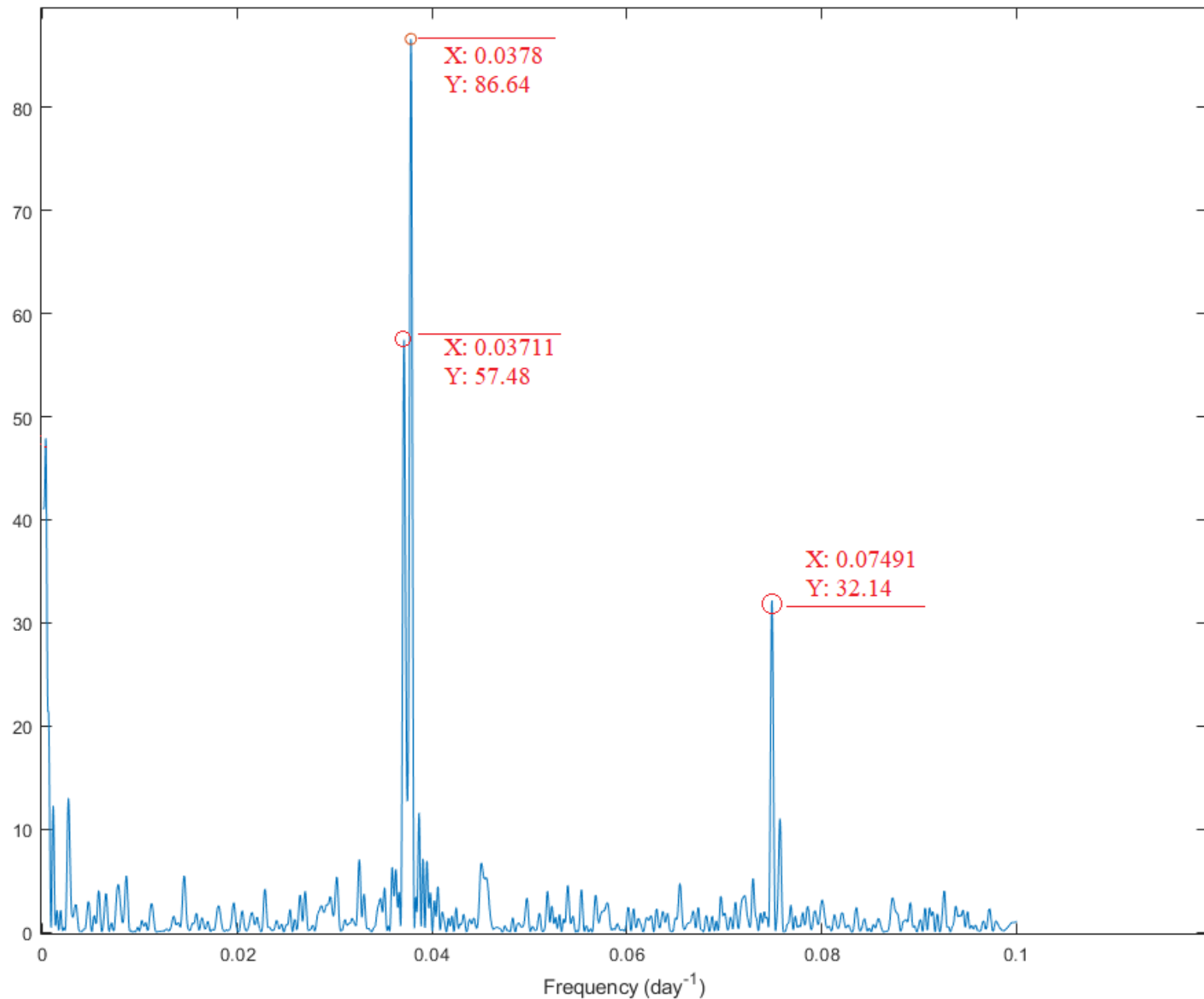
Глава 5. Анализ переменности и поиск периодичности в кривых блеска микровязара LSI+61d303



«The history of long-term studies of Galactic X-ray binaries with jet emissions with RATAN-600».

Trushkin, S. A.; Shevchenko, A. V.; Bursov, N. N.; Tsybulev, P. G.; Nizhelsky, N.

Глава 5. Анализ переменности и поиск периодичности в кривых блеска микроквара LSI+61d303



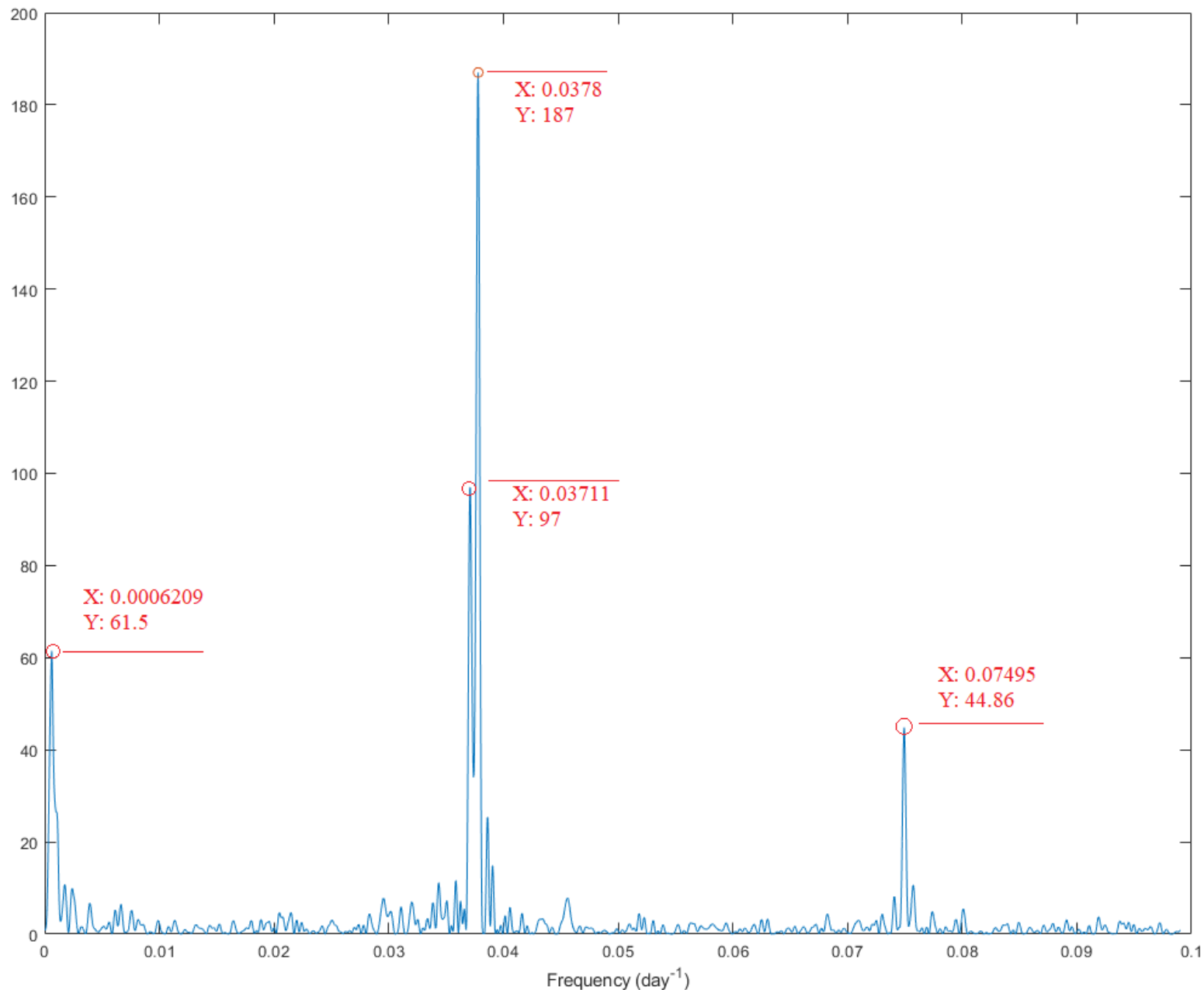
На частоте 11.2 ГГц

$$\nu_1 = 0.0378 \text{d}^{-1} \quad P_1 = 26.46 \pm 0.05 \text{ d}$$

$$\nu_2 = 0.0371 \text{d}^{-1} \quad P_2 = 26.94 \pm 0.05 \text{ d}$$

$$\nu_3 = 0.0749 \text{d}^{-1} \quad P_3 = 13.34 \pm 0.05 \text{ d}$$

Глава 5. Анализ переменности и поиск периодичности в кривых блеска микроквара LSI+61d303



На частоте 4.7 ГГц

$$\nu_1 = 0.0378 \text{d}^{-1} \quad P_1 = 26.46 \pm 0.05 \text{ d}$$

$$\nu_2 = 0.0371 \text{d}^{-1} \quad P_2 = 26.94 \pm 0.05 \text{ d}$$

$$\nu_3 = 0.0749 \text{d}^{-1} \quad P_3 = 13.34 \pm 0.05 \text{ d}$$

$$\nu_4 = 0.0006209 \text{d}^{-1} \quad P_4 = 1610.57 \text{ !!!}$$

Заключение

1. Благодаря долгосрочным программам мониторинга рентгеновских двойных систем со струйными выбросами, для некоторых объектов удалось обнаружить корреляции переменности между различными диапазонами электромагнитного спектра, главным образом, в периоды наиболее ярких событий.
2. Результаты мониторинга с 2018 по 2023 год, полученные в течение обучения в аспирантуре, показывают, что наблюдался период проявления наиболее сильной и частой активности исследуемых систем, относительно всей предыдущей истории наблюдений.
3. Успешно адаптирован режим многоазимутальных наблюдений применительно к галактическим рентгеновским двойным системам со струйными выбросами.
4. Обнаружены новые закономерности эволюции радиоизлучения на стадии формирования струйного выброса в системе Cygnus X-3.
5. Обнаружены новые значения периодической модуляции радиоизлучения в кривых блеска по радиоданным за более чем 10 лет ежедневных наблюдений на РАТАН-600 рентгеновских двойных систем LSI61d303 и SS433.
6. С высокой точностью подтверждены известные значения периодической модуляции радиоизлучения системы LSI+61d303 , исследованные в более ранних работах других авторов.

Апробация работы

1. Гигантские радиовспышки микроквазара Лебедь X-3 [устный доклад]

Шевченко А.В., Трушкин С.А., Бурсов Н.Н., Цыбулёв П.Г., Нижельский Н.А., Кудряшова А.А., Борисов А.Н.
Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия-2019», **7-11 октября, 2019**, Нижний Архыз, САО РАН

2.«Мониторинг микрокварзов на РАТАН-600». [устный доклад]

Трушкин С.А., Шевченко А.В., Бурсов Н.Н., Цыбулёв П.Г., Нижельский Н.А., Кудряшова А.А., Борисов А.Н.
Всероссийская конференция "Наземная астрономия в России. XXI век" **21-25 сентября 2020**, Нижний Архыз, САО РАН

3. Многолетние многочастотные исследования вспышечной активности микрокварзов [соавтор]

Трушкин С.А., Шевченко А.В., Бурсов Н.Н., Цыбулев П.Г., Нижельский Н.А.
Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021: «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», **23-28 августа 2021**, Москва

4. История многолетних исследований галактических ренгеновских двойных со струйными выбросами на РАТАН-600 [соавтор]

Трушкин Сергей А. (САО РАН), Шевченко А.В., Бурсов Н.Н., Цыбулев П.Г., Нижельский Н.А.
Всероссийская научная конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения – 2022» к 90-летию академика Ю.Н.Парийского, **23-27 мая 2022**, Нижний Архыз, САО РАН

5. Внутрисуточная переменность микроквазара Лебедь X-3 в период вспышечной активности [устный доклад]

Шевченко Антон В. (САО РАН) Трушкин С.А., Бурсов Н.Н., Цыбулёв П.Г., Нижельский Н.А., Кудряшова А.А., Борисов А.Н.
Всероссийская научная конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения – 2022» к 90-летию академика Ю.Н.Парийского, **23-27 мая 2022**, Нижний Архыз, САО РАН

Публикации в рецензируемых изданиях

1. «Strong low-frequency radio flaring from Cygnus X-3 observed with LOFAR».

Broderick, J. W.; Russell, T. D.; Fender, R. P.; Trushkin, S. A.; Green, D. A.; Chauhan, J.; Nizhelskij, N. A.; Tsybulev, P. G.; Bursov, N. N.; **Shevchenko, A. V.**; Pooley, G. G.; Williams, D. R. A.; Bright, J. S.; Rowlinson, A.; Corbel, S.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 504, Issue 1, p.1482-1494, June 2021

2. «The X-ray Jets of SS 433 in the Period of Flaring Activity in the Summer of 2018»

Medvedev, P. S.; Khabibullin, I. I.; Semena, A. N.; Mereminskiy, I. A.; Trushkin, S. A.; **Shevchenko, A. V.**; Sazonov, S. Yu.

Astronomy Letters, Volume 48, Issue 7, p.389-405. July 2022

3. «Исследование микроквара Лебедь X-3 на телескопе РАТАН-600 в режиме многоазимутальных наблюдений»

Трушкин, С.А.; **Шевченко, А.В.**; Бурсов, Н.Н.; Цыбулев, П.Г.; Нижельский, Н.А.; Борисов, А.Н.; Кудряшова, А.А.;

Астрофизический бюллетень. Том 78, № 2. Апрель 2023 г.

4. «Astronomical puzzle Cyg X-3 is a hidden Galactic ultraluminous X-ray source» (preprint)

Veledina, Alexandra ; ...Bursov, Nikolaj ; ...Nizhelsky, Nikolaj ; ...**Shevchenko, Anton** ; ...Trushkin, Sergei ; Tsybulev, Peter ;

eprint arXiv:2303.01174, March 2023

Публикации по материалам конференций

1. «**Monitoring of Microquasars with RATAN-600**». Trushkin, S.; **Shevchenko, A.**; Bursov, N.; Nizhelskii, N.; Tsybulev, P.; Borisov, A.; Kudryashova, A., 2020, p. 351-354
Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proceedings of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020 in Nizhny Arkhyz, Russia.
2. «**Long-term multi-frequency studies of flaring activity from microquasars**». Trushkin, S. ; **Shevchenko, A.** ; Bursov, N. ; Tsybulev, P. ; Nizhelsky, N.
Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies, Proceedings of the BAK-2021 conference, held 23-28 August, 2021 in Moscow
3. «**The history of long-term studies of Galactic X-ray binaries with jet emissions with RATAN-600**». Trushkin, S. A.; **Shevchenko, A. V.**; Bursov, N. N.; Tsybulev, P. G.; Nizhelsky, N.
4. «**The Intraday multi-frequency radio observations of the microquasar Cygnus X-3**». **Shevchenko, A. V.** ; Trushkin, S. A. ; Bursov, N. N. ; Nizhelskij, N. A. ; Tsybulev, P. G. ; Kudryashova, A. A. ; Borisov, A. N.
The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2022, 23-27 May 2022, SAO RAS

Электронные публикации [<http://www.astronomerstelegram.org>]

1. «**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**, 2019.
2. «**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**, 2019.
3. «**RATAN-600 multi-frequency measurements of GRS1915+105**». S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, P. G. Tsybulev, N. N. Bursov, **A. V. Shevchenko**, 2019.
4. «**New bright radio flare of GRS 1915+105**». S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, P. G. Tsybulev, N. N. Bursov, **A. V. Shevchenko**, 2019.
5. «**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**, 2020.
6. «**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**, 2020.
7. «**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, 2020.
8. «**Beginning of a giant radio flare from Cygnus X-3**». Trushkin, S. A.; **Shevchenko, A. V.**; Nizhelskij, N. A.; Tsybulev, P. G., 2021.
9. «**New short-time radio and X-ray flare from GRS1915+105**». Trushkin, S. A. ; Nizhelskij, N. A. ; Tsybulev, P. G. ; **Shevchenko, A. V.**, 2023
- 10 «**Giant radio flare from GRS1915+105**». Trushkin, S. A. ; Nizhelskij, N. A. ; Tsybulev, P. G. ; **Shevchenko, A. V.**, 2023

Личный вклад автора

1. Обработка записей ежедневных **суточных наблюдений** источников на трёх секторах антенны:
 - микроквazarов: SS433 (Север/Ю+П), GRS1915+105 (Север/Ю+П), Cygnus X-3 (Север/Ю+П), LSI61+303 (ЮГ);
 - опорных источников: NGC7027 (Север/Ю+П), 1850-01 (Север/Ю+П), J1347+12 (Север/Ю+П), 0244+61, 0014+62.
2. Вычисление **плотности потока** излучения микроквazarов методом калибровки по опорным источникам.
3. Построение **кривых блеска и радиоспектров** в широком диапазоне радиоволн
4. Техническое сопровождение **многоазимутальных (внутрисуточных) наблюдений**.
5. Обработка записей **многоазимутальных** наблюдений:
 - микроквazarов: SS433, GRS1915+105, Cygnus X-3;
 - опорных источников: NGC7027, J1347+12, DR21, 3C84.
6. Вычисление плотности потока излучения микроквazarов методом калибровки по опорным источникам для внутрисуточных измерений, построение кривых блеска и радиоспектров, анализ внутрисуточной эволюции сп.индекса.
7. Участие в **анализе, обсуждении и интерпретации** результатов радионаблюдений наравне с соавторами.

Благодарю за внимание!