

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Специальная астрофизическая обсерватория  
Российской академии наук  
(САО РАН)

УДК 520; 523.3; 523.9; 524  
№

УТВЕРЖДАЮ

Директор САО РАН



В.В. Власюк

«15» декабря 2016 г.


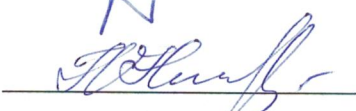
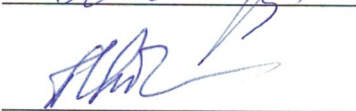
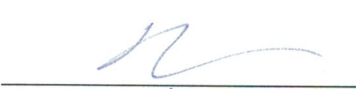

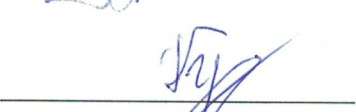
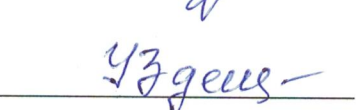
КРАТКИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ОТЧЁТ

о ходе выполнения научно-исследовательской работы по теме  
«РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СТРУИ МИКРОКВАЗАРОВ В МНОГОЧАСТОТНОМ  
МОНИТОРИНГЕ ВСПЫШЕЧНОГО ПЕРЕМЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ»  
Программы ОФН-17  
«Межзвездная и межгалактическая среда: активные и протяженные объекты»  
ЗА 2016 ГОД

Отчет принят на заседании ученого совета САО РАН «13» декабря 2016 года  
(протокол №351).

Нижний Архыз  
2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

|                                            |                                                                                    |                                                  |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Руководитель темы<br>Зав.лаб. РА, д.ф-м.н. |   | С.А. Трушкин (введение, раздел 1,<br>заключение) |
| Исполнители темы<br>зав.лаб. РК, к.ф-м.н.  |   | Н.А. Нижельский (раздел 1)                       |
| с.н.с. лаб. РК                             |   | П.Г. Цыбулев (раздел 1)                          |
| с.н.с. лаб. РА                             |   | Н.Н. Бурсов (раздел 1)                           |
| вед. инженер САО РАН                       |   | Г.В. Жеканис (раздел 1)                          |
| ст. техник                                 |   | И.Е. Кривлина (раздел 1)                         |
| Нормоконтролер                             |  | Узденова Ш.А.                                    |

## РЕФЕРАТ

Отчет 12 с., 1 прил.

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕЛЕСКОПЫ, СВЕТОПРИЁМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА КОСМОЛОГИЯ, ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, БАЗЫ ДАННЫХ

Цель работы - осуществление научной и научно-технической деятельности, в том числе проведение фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, в области астрономии и смежных с ней наук.

В рамках проведения этапа были выполнены интенсивные исследования выборки микроквazarов — рентгеновских двойных систем с релятивистскими струйными выбросами вещества из центральных областей вокруг аккрецирующей черной дыры.

Тема включает мониторинг выборки микроквazarов с помощью радиотелескопа РАТАН-600 в диапазоне частот от 2 до 22 ГГц с целью более ясного определения природы струйной активности и связи ее с процессами аккреции на релятивистские компоненты. Наблюдения выполнялись почти ежедневно (около 320 дней - с 9 января по 30 декабря 2016 года) на радиометрах 2.3, 4.6, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц и на трех антеннах телескопа «Северный сектор», «Южный сектор» и «Южный сектор с перископом». С 10 ноября 2016 года был восстановлен радиометр на частоте 30 ГГц в штатном комплексе широкополосных радиометров. Наблюдения на «Южном секторе» выполнены на трех-частотном комплексе радиометров «Эридан» (4.7, 11.2 и 21.7 ГГц).

Были исследованы микроквazarы SS433, GRS1915+105, Cyg X-1, Cyg X-3, LS5039, V4641 Sgr и LSI+61d303. Для точной калибровки и сравнительного анализа исследовались несколько ярких квazarов с плоскими спектрами (J2007+40, J2015+37, J0014+61, J0244+62), которые тоже являются источниками с релятивистскими струями. В почти ежедневном режиме наблюдались несколько вторичных калибраторов (3C286, 3C48, 3C161, 3C138, NGC7027 и др.).

## СОДЕРЖАНИЕ

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....               | 6  |
| 1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ..... | 7  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....            | 9  |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....          | 10 |
| СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ .....     | 10 |

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

LOFAR - европейский радиоинтерферометр метрового диапазона, который разработан для исследований широкого класса космических источников

РАТАН-600 - рефлекторный радиотелескоп Российской академии наук, входящий в состав крупных телескопов САО РАН

SMA — субмиллиметровая антенная решетка, расположенная на Гавайях

FERMI - космическая обсерватория, работающая в гамма-диапазоне

Swift/BAT -- космическая обсерватория Свифт оснащен телескопом алертных событий, работающий в диапазоне 15-50 кэВ, и на котором проводится постоянный мониторинг нескольких сот космических источников.

MAXI - рентгеновский монитор на борту МКС.

АЯГ - ядра активных галактик

НЗ - нейтронная звезда

ЧД - черная дыра

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования переменного радиоизлучения рентгеновских двойных систем с релятивистскими струями дает уникальную возможность найти взаимосвязь процессов аккреции вещества на релятивистский компонент (черную дыру или нейтронную звезду), перетекающей с нормальной звезды. Процессы образования струйных выбросов до сих пор не определены однозначно, хотя существует несколько теоретических моделей, применимых и для звездных и для внегалактических объектов. Радиоизлучение является хорошим индикатором периодических или спорадических процессов нестационарной аккреции в объектах данного типа. Причем, что особенно важно, в микрокварах все процессы идут на несколько порядков быстрее, чем в квазарах, поэтому их излучение легче и эффективнее исследовать. С другой стороны, исследуя суточную или недельную переменность квазаров и АЯГ, в центре которых находится аккрецирующая сверх-массивные черные дыры, мы можем проникнуть в процессы, аналогичные переменности микроквazarов на временах меньше секунды, если нормировать геометрию аккреционных дисков на гравитационный радиус ЧД. А такие исследования не доступны для обычных радиотелескопов.

Важным элементом современных астрономических исследований являются совместные программы в разных диапазонах — от радиоволн до гамма-лучей. Именно поэтому данные по интегральному радиопотоку, которые мы получаем в ходе исследований на радиотелескопе РАТАН-600, так востребованы астрономической общественностью.

На радиотелескопе РАТАН-600 создана процедура точных измерений плотностей потока в широком диапазоне частот от 2 до 23 ГГц в ежедневных измерениях источников ярче 30 мЯн, что позволяет проводить мониторинг практически всех ярких микроквazarов в Млечном пути. Тем не менее сотрудники лаборатории радиоконтинуума постоянно совершенствуют точность калибровки радиометров с помощью точных генераторов шума. В некоторых случаях мы применяем режим неподвижного фокуса, который увеличивает точность калибровки антенной системы.

## 1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках проведения этапа 2016 года были выполнены интенсивные исследования выборки микроквazarов.

Проведен мониторинг выборки микроквazarов с помощью радиотелескопа РАТАН-600 в диапазоне частот от 2 до 22 ГГц с целью более глубокого определения струйной активности и связи ее с процессами аккреции на релятивистские компоненты. Наблюдения выполнялись почти ежедневно (около 300 дней из 350 - с 1 января по 30 декабря 2016 года) на радиометрах 2.3, 4.8, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц и на трех антеннах телескопа «Северный сектор», «Южный сектор» и «Южный сектор с перископом». Исследованы микроквazarы SS433, GRS1915+105, Cyg X-1, Cyg X-3, LS5039, V4641 Sgr и LSI+61d303. Для точной калибровки и сравнительного анализа исследовались несколько ярких квazarов с плоскими спектрами, которые тоже являются источниками с релятивистскими струями.

В целом в 2016 г. проведено свыше 5000 многочастотных наблюдений потоков от семи микроквazarов и около 30 квazarов на 2-6 частотах одновременно. То есть выполнены ~17000 измерений плотностей потока от космических источников. Средняя точность измерений составляет 3-10 процентов в зависимости от диапазона частот и от яркости источника. Для всех источников, где регистрируется поток в одном наблюдении, построены кривые блеска и/или мгновенные спектры. Кроме того наблюдались 3-5 опорных источников одновременно с исследуемыми. По объему и частотному диапазону подобные исследования не проводятся нигде в мире.

### 1.1

Релятивистские струи вещества из центральных областей аккреционного диска вокруг черной дыры (ЧД) иногда так меняют свои свойства. В 2014-2016 годах микроквazar Cyg X-3 находился в относительно спокойном состоянии, не было ни одной вспышки выше потока 0.5 Ян. Мы считаем, что природа спокойного радиоизлучения Cyg X-3, которое имеет преимущественно инвертированный или плоский радиоспектр, может быть связана с взаимодействием выброса вещества относительно близко над аккреционным диском, возможно на границе короны диска и окружающей околозвездной среды. Таким образом мы видим постоянно действующий генератор релятивистских частиц на границе короны, что называют в литературе по микроквazarам «компактным джетом». Впервые с помощью известного метода Ломба-Скаргла для временных рядов нам удалось открыть значимую периодическую модуляцию в этом спокойного радиоизлучения. Выделенный период изменений, равный  $12.8 \pm 0.2$  дня, хорошо выявляется на

кривых блеска во всех частотных диапазонах. Он также выделяется и в одновременных данных измерений со спутника Swift. Вероятно природа этой модуляции — прецессия аккреционного диска, которая в свою очередь вызывает покачивание основания струйных выбросов. На почти пятилетнем материале мы сравнили детальные кривые блеска Cyg X-3 в жестком рентгеновском диапазоне (15-50 кэВ, Swift/BAT) с нашими радиоданными. Обнаружена высокая отрицательная корреляция: чем выше рентгеновский поток, тем ниже радиопоток, и наоборот. После сглаживания ежедневных радио и рентгеновских измерений на интервале 10 дней коэффициент корреляции вырастает до -0.9. Этот вывод сделан на основе материала около 2000 дней, что их радиояркость увеличивается в тысячи раз. Такое редкое событие мы зарегистрировали на радиотелескопе РАТАН-600 13 сентября 2016 года, когда поток Лебедь X-3 вырос от 0.01 до 15 янских на 4.6 ГГц за четыре дня. За две недели до этого мы предсказали эту вспышку на основе анализа прежних наблюдений: вспышка происходит после выхода системы из «ультрамягкого» состояния, когда при ее высокой яркости в мягком рентгеновском диапазоне (ниже 10 кэВ) в жесткой области (выше 15 кэВ) поток падает до нуля. Из вещества со звезды Вольфа-Райе при падении на ЧД создается горячий аккреционный диск, окруженный еще более горячей короной, а радиоволны идут от плотных коротких струй по обе стороны от диска. Внезапно поток вещества возрастает, центр диска еще больше разогревается, а корональное излучение и радиоструи исчезают. По заполненным веществом струям бегут ударные волны УВ, а в них эффективно ускоряются электроны, генерирующее синхротронное радиоизлучение и даже гамма-излучение. Релятивистское движение УВ и расширение струй приводит к быстрой эволюции оптически тонкого радиоизлучения на частотах 1-21 ГГц и затуханию вспышки.

## 1.2

В 2016 году выполнен мониторинг радиоизлучения микроквазара, гамма-источника, LSI+61d303 на частотах 4.8 и 11.2 ГГц. В течение уже накопленных почти 33 последовательных орбитальных периодов ( $P=26.5d$ ) мы наблюдали периодические вспышки, спустя несколько дней после прохождения периастра релятивистским объектом (черной дырой или нейтронной звездой), в ходе которого заполняется аккреционный диск и образуются струйные выбросы, в которых генерируется радиоизлучение. Построив среднюю по периодам орбитальную кривую блеска мы установили, что радиоизлучение эволюционирует от оптически толстого состояния в начале вспышки к оптически тонкому состоянию, когда спектральный индекс достигает максимального отрицательного значения -0.55, затем радиоизлучение постепенно возвращается к плоскому спектру с нулевым индексом. Такой индекс характерен для генерации релятивистских электронов



в сильных ударных волнах, в данном случае бегущих по телу газового джета. Все это хорошо соответствует теории эволюции синхротронного излучения при однократной генерации релятивистских электронов и последующего расширения области с этими электронами. Впервые на основе собственных наблюдений нам удалось точно определить период радиовспышек. Мы применили известный метод поиска периодичностей во временных рядах Ломба-Скаргла. Период вспышек оказался равен  $26.62 \pm 0.05$  дням, что соответствует ранее найденному орбитальному периоду системы 26.5 дня. Правда, в отличие от работы Масси и др. (2013) кроме этой основной гармоникой мы не обнаружили никаких биений с периодичностью близкого периода, которая могла бы отвечать на прецессионное движение струй. Мы также обнаружили заметное смещение моментов наступления максимума радиопотока вспышек по мере изменения фазы сверхорбитального 4.6-летнего периода. Однако эти моменты не соответствуют предсказаниям эфемерид Грегори (2002) и Масси (2013), то есть можно предположить, что или этот 1667-дневный период медленно меняется, или он изначально определен неточно. Кроме того мы впервые заметили, что смещение максимума радиопотока вспышек происходит скорее скачком, а не плавно в диапазоне орбитальных фаз 0.4 — 0.8. Мы также обнаружили заметное смещение моментов наступления максимума радиопотока вспышек по мере изменения фазы сверхорбитального 4.6-летнего периода (P2). К тому же и сами максимумы заметно понизились по уровню на фазах  $P2=0.1-0.4$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проводимые по данной программе наблюдения остаются серьезным аргументом в организации алертных (ToO) программ по исследованию активных процессов во всем классе космических источников со струйными выбросами — ядрах активных галактик и микрокварах. Прекрасным примером таких алертных наблюдений служат наши исследования летней вспышки микроквара V404 Cyg, когда в течение одних суток радиопоток вырос в 40 раз. Несомненно эта вспышка ассоциируется с активностью в гамма-диапазоне (Интеграл, AGILE, FERMI) (Pianto et al. 2017). Причем до этого поток от источника был ниже порога обнаружения на крупных радиотелескопах.

В будущей работе мы сосредоточимся на исследовании уже измеренных временных и спектральных характеристик кривых радиоблеска, их сравнение с исследованиями в других диапазонах, построение адекватной модели радиопеременности и поиск новых закономерностей в переменном излучении микрокваров.

Намечены новые циклы измерений выборки микрокваров. Это в первую очередь продолжение цикла исследований LSI+61d303, чтобы добиться полного заполнения всего 4.6- летнего периода (1667 дней) этого источника.

Продолжается постоянный мониторинг активности микрокваров с целью оперативного оповещения астрономической общественности о вспышечных событиях в микрокварах.

Этой цели служат и поданные и принятые заявки на наблюдения микрокваров в миллиметровом диапазоне (SMA), гамма-диапазоне (FERMI и ИНТЕГРАЛ) и совместные программы по мониторингу с AMI (15 ГГц) и др. Наконец, мы уделяем внимание развитию метода многоазимутальных измерений на антенной системе «Южный сектор с плоским отражателем» и чувствительным радиометрам кабины N3. Это существенно расширит возможности телескопа для исследования внутрисуточной переменности микрокваров.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

#### В ИНОСТРАННЫХ РЕФЕРИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ

1. Punsly, B., Rodriguez, J., Trushkin, S.A., The Accretion Flow-Discrete Ejection Connection in GRS 1915+105, 2016, The Astrophysical Journal, 826, 5

#### В РОССИЙСКИХ РЕФЕРИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

1. Трушкин С.А., Радиоизлучение микроквazarов, 2016, Земля и Вселенная, N5, с. 24-50

#### В МАТЕРИАЛАХ КОНФЕРЕНЦИЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЯ

1. Trushkin, S. A., Nizhelskij, N. A., Tsybulev, P. G., Zhekanis, G.V., The giant radio flare of Cyg X-3 in September 2016, 2016, Stars: from collapse to collapse: Proc. Conf. held at Spec. Astrophys. Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 3-7 Oct. 2016, ASP Conf. Ser., 4pp.
2. Trushkin, S. A., Nizhelskij, N. A., Tsybulev, P. G. 900-day radio monitoring of X-ray binary LSI+61d303 with RATAN-600 telescope , EWASS-2016, Symposium 15: Exploring pulsar formation, evolution and magnetic field: from low mass X-ray binaries to magnetars Athens, Greece, 2016, 4-8 July.

#### ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ (ТЕЛЕГРАММЫ И ЦИРКУЛЯРЫ)

1. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., 2016. The high radio fluxes from NGC1275, The Astronomer's Telegram, N.9791
2. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. The predicted giant flare of Cyg X-3 occurs, The Astronomer's Telegram, N.9501
3. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. A third bright radio flare of SS433 during 2016, The Astronomer's Telegram, N.9481
4. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. The beginning of a giant radio flare from Cygnus X-3, The Astronomer's Telegram N.9444.
5. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. A new state of quenched radio emission from microquasar Cyg X-3, The Astronomer's Telegram N.9416
6. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Erkenov, A., 2016. Monitoring of 87GBJ1929+0909

with RATAN-600 after ESE, The Astronomer's Telegram N.9092

7. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., Zhekanis, G.V., 2016. New RATAN-600 data for Cygnus X-1, The Astronomer's Telegram N.9089
8. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Tsybulev, P.G., 2016. High radio fluxes of PKS2023-07 measured with RATAN-600, The Astronomer's Telegram N.8893
9. Trushkin, S.A., Nizhelskij, N.A., Erkenov, A., 2016. RATAN-600 data for Fermi J0035+6131, The Astronomer's Telegram N.8718