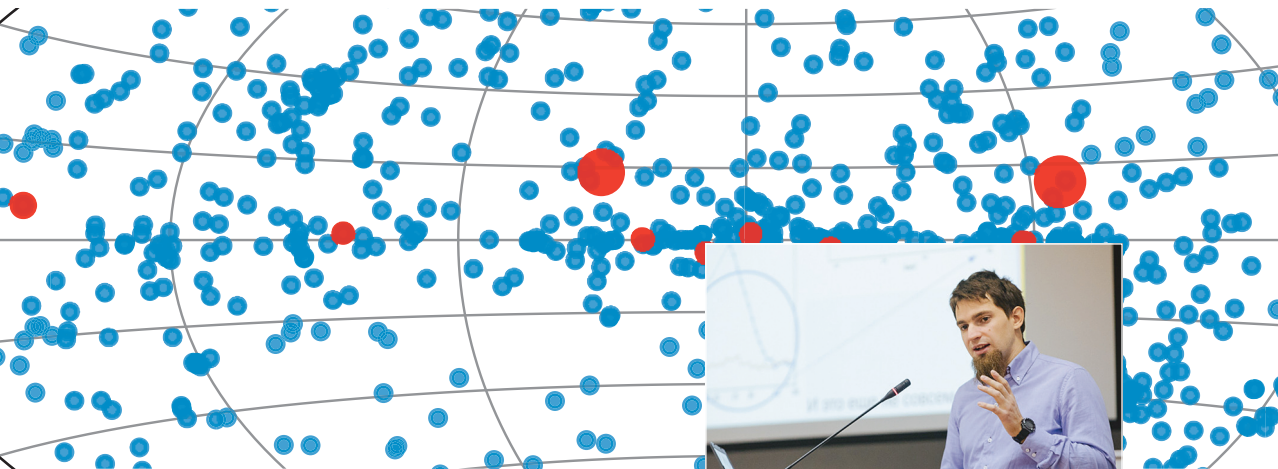


НОВЫЕ СИЛЬНОПЕРЕМЕННЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ В ОБЗОРЕ ВСЕГО НЕБА ТЕЛЕСКОПА ART-XC им. М.Н. ПАВЛИНСКОГО



МЕРЕМИНСКИЙ Илья Александрович,

кандидат физико-математических наук

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/5004439482204003X

ВВЕДЕНИЕ

Все мы привыкли смотреть на небо и видеть там знакомые созвездия и астеризмы. И действительно, крайне редко на небосводе появляются новые яркие звезды – раз в столетие вспыхивает очередная сверхновая в Галактике, да несколько раз в год появляются новые, впрочем, обычно не такие яркие. А уж представить себе, чтобы какая-то видимая звезда просто погасла и вовсе невозможно. Эти банальные наблюдательные факты объясняются тем, что временные масштабы, на которых в звездах протекают реакции термоядерного синтеза, достаточно

велики и составляют миллионы-миллиарды лет, в течение которых звезды светят стабильно.

С развитием астрономии в XX–XXI вв. человечество получило возможность взглянуть на небо в непривычных для себя диапазонах электромагнитного спектра: от дециметровых радиоволн до жесткого гамма-излучения. Далеко не все такие наблюдения оказалось возможно проводить с поверхности Земли – плотная атмосфера полностью поглощает коротковолновое излучение, из-за чего для работы в УФ-диапазоне, а также в рентгеновских и гамма-лучах пришлось строить специализированные космические обсерватории. Именно успехи этих обсерваторий позволи-

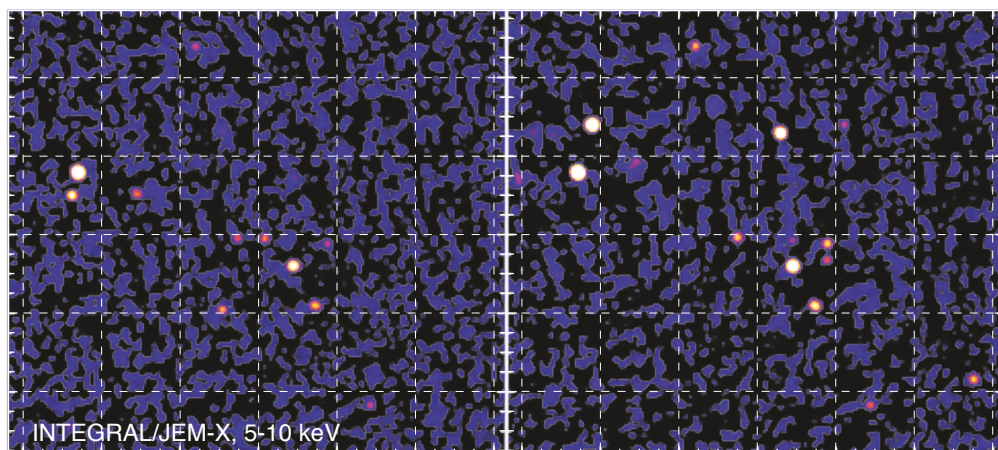


Рис. 1. Карты области Галактического центра, полученные телескопом JEM-X на борту обсерватории ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 5–10 кэВ. Слева – карта, накопленная за 2007–2008 гг., справа – за 2012–2013 гг. Карты приведены в галактических координатах, центр карты совпадает с началом отсчета координатной системы, размер квадрата координатной сетки 1×1 градус

ли в последние десятилетия подробнее рассмотреть рентгеновское небо, которое оказалось удивительно переменчивым.

И этому тоже есть внятное объяснение. Самый распространенный механизм генерации рентгеновского излучения – аккреция вещества на компактные объекты (черные дыры, нейтронные звезды или белые карлики) – очень эффективен, его удельное энерговыделение более чем на порядок выше, чем у термоядерного синтеза. Из-за этого ярчайшими объектами на небе являются не обычные звезды, которые вообще излучают в рентгеновском диапазоне довольно слабо, а так называемые «рентгеновские двойные» – двойные звездные системы, в которых вещество с обычной звезды перетекает на компактный объект. Перенос вещества оказывается весьма нестабильным процессом, темп которого может меняться на многие порядки буквально за минуты. Все это приводит к тому, что в десятке ярчайших рентгеновских объектов на небе почти ежедневно

случаются перестановки, а примерно раз в год в нее вообще врываются совершенно новые, ранее не известные источники. На рис. 1 приведены две рентгеновские карты самой плотно населенной области на небе, Галактического центра, полученные телескопом JEM-X обсерватории ИНТЕГРАЛ осенью 2007 – весной 2008 г. (слева) и осенью 2012 – весной 2013 г. (справа). Хорошо видно, что большинство источников сильно изменили свой блеск – некоторые вспыхнули, а часть источников просто «выключилась».

Поиск и исследование таких сильно переменных объектов – транзиентов – важен и для исследования процессов аккреции вещества в рентгеновских двойных, и для изучения популяции рентгеновских источников в Галактике. В настоящее время в околоземном пространстве работает несколько экспериментов, специально предназначенных для их поиска. А можно ли искать транзиенты, используя телескопы обсерватории «Спектр-РГ», и если да, то какие?

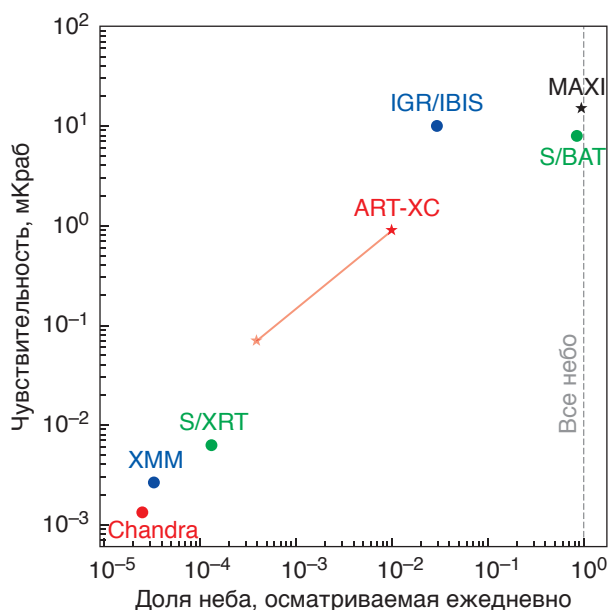
ОБСЕРВАТОРИЯ «СПЕКТР-РГ» И ВОЗМОЖНОСТИ ТЕЛЕСКОПА ART-XC

Главной целью запущенной в 2019 г. российской обсерватории «Спектр-РГ» является проведение обзора всего неба – и не одного, а целых восьми. Для выполнения этой амбициозной задачи на борту обсерватории были установлены телескопы eROSITA (Германия) и ART-XC им. М.Н. Павлинского (Россия) и предложена специальная стратегия наблюдений: в ходе обзора обсерватория вращается вокруг оси Солнце–Земля, совершая полный оборот за 4 часа. Следуя за вращением Земли вокруг Солнца, за полгода обсерватория осматривает все небо. Таким образом, в ходе обзора телескоп ART-XC им. М.Н. Павлинского осматривает примерно 1% всего неба каждый день. Другим важным режимом наблюдений ART-XC является проведение глубоких обзоров с характерной скоростью в ≈ 10 квадратных градусов в день.

Для обоих этих режимов работы комбинация скорости покрытия неба и чувствительности для ART-XC оказывается промежуточной между широкопольными рентгеновскими инструментами, такими как MAXI, *Swift*/BAT или IBIS/ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ (ESA), и более чувствительными телескопами, оснащенными рентгеновской оптикой косого падения, в первую очередь XMM-Newton (ESA), *Chandra* (NASA) и *Swift*-XRT (NASA). Наглядно это изображено на рис. 2. Это промежуточное положение оказывается неожиданно

интересным – оно позволяет искать (и, как будет показано далее, находить!) объекты, слишком тусклые для того, чтобы быть обнаруженными широкопольными телескопами, и слишком редкими для того, чтобы случайно попасть в поле зрения чувствительных зеркальных телескопов. При этом даже слабые вспышки рентгеновских двойных (с характерной светимостью 10^{35} эрг с^{-1}) ART-XC может выидеть на расстояниях до 10 кпк, то есть в значительной части Галактики, и почти в любой точке ее балджа (центральной области Галактики). А поскольку ART-XC работает в достаточно жестком рентгеновском диапазоне от 4 до 30 кэВ, его чувствительность меньше зависит от количества межзвездной пыли

Рис. 2. Характерные скорости обзора неба и чувствительности для некоторых современных рентгеновских телескопов. Для ART-XC показаны характерные чувствительности в обзоре всего неба (ярко-красная звезда) и в обзоре глубоких площадок (розовая звезда)



в направлении на источник, что важно вблизи плоскости Галактики и в ее центральных областях. Все это делает ART-XC очень подходящим инструментом для поиска этих редких объектов.

Для подробного изучения таких систем, однако, недостаточно только рентгеновских данных, необходимо еще правильно отождествить рентгеновский объект в других диапазонах длин волн, в первую очередь в оптическом. И эта задача также довольно сложна: из-за недостаточной точности локализации, а для слабых источников ART-XC может определять положение с точностью около 15", в число возможных кандидатов могут попадать несколько звезд (а в Галактической плоскости и десятки звезд), между которыми необходимо выбирать. Помочь в решении этой задачи может как второй телескоп обсерватории eROSITA, обладающий лучшим угловым разрешением, так и исследование отдельных звезд из области локализации – сильная переменность, аномальное соотношение оптических цветов или избыток излучения в линиях водорода могут быть указаниями на то, что данная звезда является истинным компаньоном рентгеновского объекта.

После отождествления оптического компаньона начинается его изучение с использованием всего арсенала методов классической астрономии. Наблюдения источников, открытых ART-XC, проводятся на российских телескопах – на 1.6-метровом телескопе Саянской обсерватории, Российско-Турецком 1.5-метровом телескопе, а также на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. К наблюдениям особо интересных объектов привлекаются и зарубежные телескопы, в том числе крупнейшие, такие как 10-метровый телескоп SALT

Южноафриканской астрономической обсерватории и 10-метровые телескопы им. Кека на Гавайях.

НОВЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ

Как уже было сказано, ярчайшие объекты на рентгеновском небе в большинстве своем являются двойными рентгеновскими системами, и именно для их поисков наилучшим образом подходит телескоп ART-XC. Всего за время работы обсерватории были обнаружены около двух десятков новых аккреционных вспышек в таких системах – как в ранее известных, так и в новых.

В частности, весной 2020 г. были обнаружены два интересных рентгеновских транзита, расположенных не слишком близко к плоскости Галактики. Один из них оказался известным историческим источником 4U 1755-338, открытым еще по данным обсерватории *Uhuru*. Этот источник был активен с момента своего открытия в 1970-х гг. и до 1996 г., когда неожиданно перешел в «тихое» состояние и с тех пор больше не регистрировался. Позже, по данным рентгеновских наблюдений, вблизи положения источника были обнаружены вытянутые протяженные структуры. Таким образом, оказалось, что этот объект является представителем редкого класса «микроквazarов» – систем, в которых аккреция сопровождается мощным струйным выбросом вещества. За десятилетия активности источника релятивистская струя (также называемая джетом) в этой системе успела надуть огромные «пузыри» в межзвездном пространстве размером в несколько парсек, которые и были обнаружены позже.

Второй же источник оказался рентгеновским компаньоном открыто-

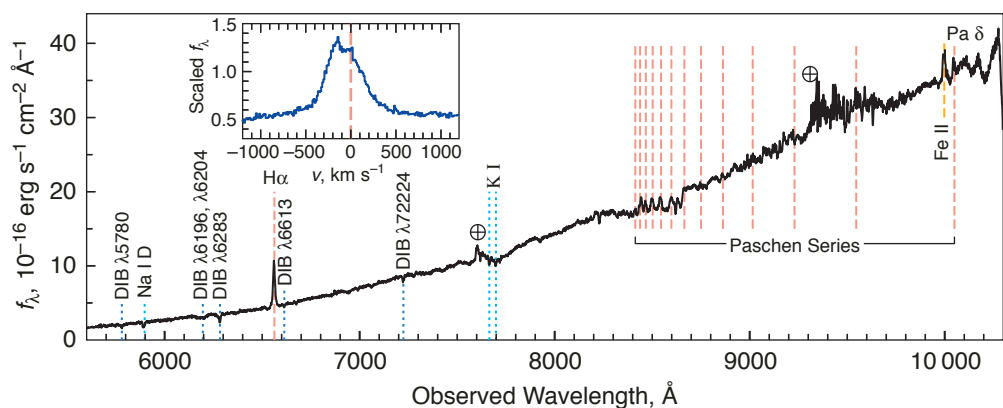


Рис. 3. Оптический спектр SRGA J204318.2+443815, характерные спектральные особенности показаны красными прерывистыми линиями, синими линиями отмечены линии поглощения, возникающие на межзвездной среде. На врезке показан профиль линии H-alpha. Рисунок из статьи Лутовинова и др., 2021

го в конце 2019 г. яркого оптического транзита AT2019wey, который, впрочем, не привлек к себе особенного внимания. Оптические и радионаблюдения, последовавшие за открытием телескопом ART-XC рентгеновского излучения от AT2019wey показали, что он также является микроквазаром, а интерферометрические наблюдения позволили разрешить компактный радиоджет в этой системе. Оптическая спектрометрия показала, что в видимом свете, кроме вклада многоцветного аккреционного диска, присутствует также и излучение «горячего пятна» на звезде-доноре – области, разогретой жестким излучением, приходящим от компактного объекта. Обнаружение подобных систем на ранних этапах вспышки – большая удача, поскольку это позволяет проследить за совместной эволюцией оптического, рентгеновского и радиоизлучения в микроквазарах.

В конце 2020 – начале 2021 г. были открыты два новых рентгеновских источника, на этот раз проецирующиеся гораздо ближе к плоскости Галактики. В области локализации обоих объектов

попали яркие в видимом и инфракрасном диапазонах звезды, в спектрах которых позже были обнаружены широкие эмиссионные линии водорода (H α). Все это однозначно указывает на то, что данные объекты – рентгеновские двойные, в которых звездой-донором является Ве-гигант с мощным экваториальным ветровым истечением, так называемым декреционным диском. На рис. 3 показан оптический спектр объекта SRGA J204318.2+443815 (SRGA указывает на то, что источник был открыт телескопом ART-XC), полученный спектрометром LRIS на 10 м телескопе им. Кека. Присутствие линий излучения H β , He I, Fe II, а также линий в серии Пашена (Pa7-Pa19) позволило определить спектральный класс звезды донора B0-2e. Показанный на врезке профиль линии H α , измеренный эшелле-спектрометром ESI, подтверждает наличие в системе мощного декреционного диска, характерный масштаб скоростей в котором, судя по измеренному уширению, составляет $\approx 500 \text{ km s}^{-1}$. Как правило, компактными объектами в таких системах являются сильнозамагниченные, быстровращающиеся нейтронные

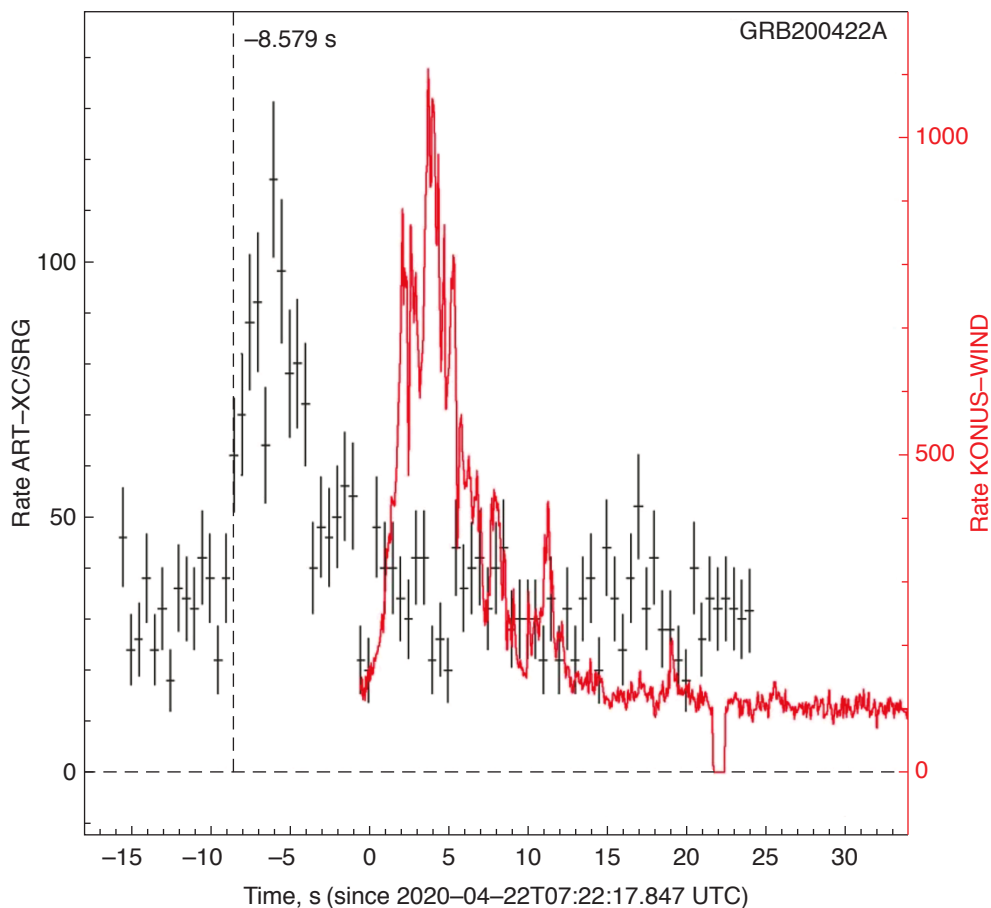


Рис. 4. Полный темп счета детекторов ART-XC (черные точки) и Конус-ВИНД (красные точки)

звезды. Несовпадение оси магнитного диполя, на полюса которого выпадает вещество, и оси вращения нейтронной звезды проявляется для наблюдателя как когерентные пульсации рентгеновского потока. И действительно, для обоих источников такие пульсации были обнаружены – с периодами в ≈ 742 и ≈ 538 с. Стоит отметить что для Ве-систем такие периоды скорее нехарактерно длинные – обычно период вращения НЗ в них составляет единицы–десятки секунд. Обе эти системы, скорее всего, принадлежат к пока малочисленному классу Ве-систем с низкой светимостью

($1...5 \times 10^{35}$ эрг с^{-1}), в которых происходит аккреция из «холодного» (т. е. низко-ионизованного) аккреционного диска. Уже исходя из этих первых открытий, стало ясно, что ART-XC существенно увеличит их выборку, в первую очередь за счет масштабности своего обзора.

ПРОЧИЕ ТРАНЗИЕНТЫ – ТУСКЛЫЕ И ЯРКИЕ

На рис. 5 показаны все источники, зарегистрированные телескопом ART-XC в ходе первых двух полных обзоров

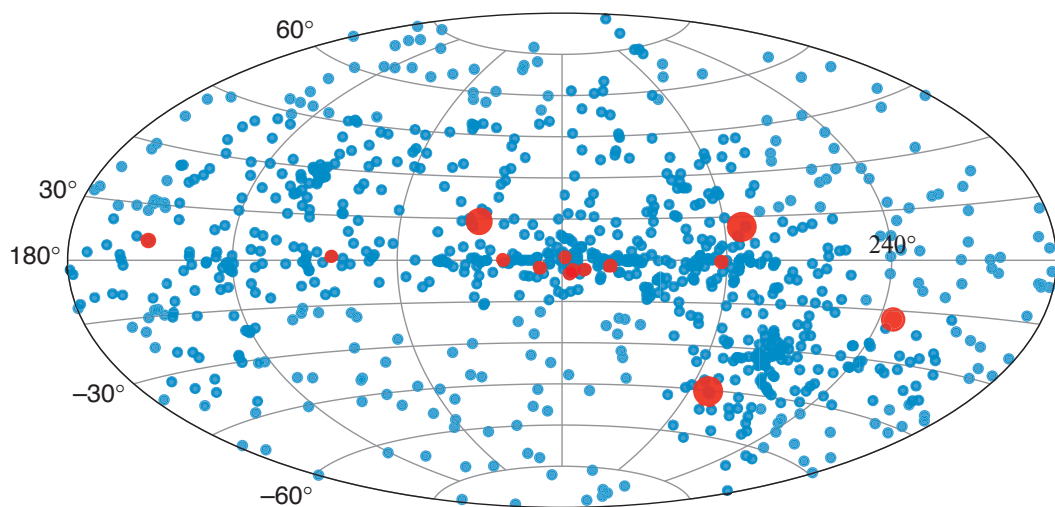


Рис. 5. Карта неба в Галактической проекции с нанесенными источниками из каталога первого года ART-XC (показаны синими точками). Красными кружками указаны рентгеновские транзиенты, обнаруженные ART-XC, причем размер кружка обратно пропорционален расстоянию до источника

неба, а также обнаруженные Галактические транзиенты. Видно, что среди них присутствуют две популяции – далекая, концентрирующаяся к диску, и более равномерно распределенная близкая. С представителями первой популяции мы познакомились в предыдущей части, но что же за объекты составляют вторую?

Если вспышки рентгеновских двойных видны телескопом ART-XC из большей части Галактики, то более слабые объекты будут регистрироваться, только если они происходят недалеко от Солнечной системы, в пределах нескольких сотен парсек. Большинство таких систем – это катаклизмические переменные (КП) – двойные системы, в которых аккреция идет на белый карлик. Поскольку компактность, т. е. отношение массы к радиусу у белых карликов (БК) меньше, чем у нейтронных звезд и черных дыр, то и удельное энерговыделение

будет меньше. Впрочем, таких систем гораздо больше, чем рентгеновских двойных с нейтронными звездами и черными дырами, – по разным оценкам в кубическом килопарсеке вокруг Земли (т. е. в пределах чувствительности ART-XC) подобных систем должно быть тысячи–десятки тысяч, и распределены они в этом пространстве достаточно однородно. Именно поэтому такие объекты обнаруживаются ART-XC «со всех сторон». Около сотни аналогичных объектов было найдено в годовом обзоре, многие как переменные источники.

Благодаря современным оптическим обзорам неба обнаруживаемые ART-XC катаклизмические переменные могут быть легко отождествлены – на каждый из таких источников уже есть долговременная оптическая кривая блеска, а поскольку расстояния до КП в среднем небольшие, то и поглощение на межзвездной пыли

обычно невелико, что упрощает дальнейшие спектроскопические и фотометрические исследования. Эти исследования позволяют измерить ряд важных наблюдательных свойств КП, в первую очередь орбитальный период. Однако некоторые характеристики самого белого карлика, оказывается, удобнее определять по наблюдениям в рентгеновском диапазоне, особенно если у него сильное магнитное поле. Рентгеновский спектр таких объектов позволяет измерять массу БК, радиус его магнитосферы и определять период вращения. Важно то, что эти задачи могут решаться и самим ART-XC во время фазы точечных наблюдений. Таким образом, поиск и отождествление новых магнитных КП создает задел для будущих работ обсерватории.

Наконец, стоит заметить, что кроме КП есть еще одна популяция сильнопеременных источников, распределенная равномерно по всему небу. Это гамма-всплески – мощнейшие выбросы энергии, происходящие при катастрофических событиях, сопровождающих последние секунды жизни звезд. Короткие, продолжительностью менее секунды, всплески рождаются при слияниях двойных нейтронных звезд или систем из нейтронной звезды и черной дыры, а длинные всплески сопутствуют вспышкам сверхновых. Эти события случаются довольно часто, примерно по нескольку событий в день на всем небе, однако из-за их малой продолжительности шансы увидеть такое событие в поле зрения для ART-XC крайне низки. Впрочем, как оказалось, эти события достаточно ярки для того, чтобы их излучение было видно в тех случаях, даже когда вспышка происходит не в поле зрения телескопа. Жесткие гамма-лучи с энергиями в сотни кэВ проходят сквозь матери-

ал обсерватории и регистрируются детекторами ART-XC. На рис. 4 показан темп счета детекторов ART-XC в диапазоне энергий 40–100 кэВ. Поскольку эффективная площадь рентгеновских зеркал в этом диапазоне практически нулевая, то в нем регистрируются в основном события, связанные с прохождением заряженных частиц, фон которых в окрестности точки Лагранжа L_2 весьма стабилен. Короткий всплеск темпа счета вызван гамма-всплеском GRB200322A, который произошел в тот момент, когда обсерватория СРГ была повернута к нему «боком». Из-за расположения всплеска на небе и конечной скорости распространения света сигналу понадобилось почти 9 секунд для того, чтобы добраться до другого российского инструмента – прибора КОНУС, установленного на спутнике WIND в точке Лагранжа L_1 . Измеряя задержки между приходом всплеска на приборы, установленные на космических аппаратах, расположенных в разных частях Солнечной системы, можно определять положение гамма-всплеска на небе методом триангуляции, как это делает Межпланетная сеть (IPN).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что поиск новых сильнопеременных источников не является основной задачей обсерватории «Спектр-РГ», благодаря выбранной стратегии обзора и своим характеристикам телескоп ART-XC им. М.Н. Павлинского позволяет находить новые Галактические транзиенты разных классов, как в диске Галактики, так и вблизи Солнечной системы, а также регистрировать гамма-всплески. Это открывает новые возможности по изучению их популяций и позволяет исследовать уникальные объекты.