

---

ИСТОРИЧЕСКИЕ, АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ И  
ИСКУССТВОВЕДЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

---

УДК 908.520.1 +52-735

**ИССЛЕДОВАНИЯ УЧЕНЫХ КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ  
ОБСЕРВАТОРИИ АН СССР В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН  
НА КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АСТРОН»**

**Щербина А.Д.**

*Управление Российской Академии Наук по взаимодействию с научными организациями  
Республики Крым и города федерального значения Севастополя, пгт Никита, г. Ялта,  
Российская Федерация, e-mail: [aas175740@yandex.ru](mailto:aas175740@yandex.ru), [aas@iki.rssi.ru](mailto:aas@iki.rssi.ru)*

В статье освещена научно-исследовательская работа ученых Крымской астрофизической обсерватории АН СССР на космической станции «Астрон» в одном из приоритетных направлений астрофизических исследований – рентгеновской астрономии. Установлены особенности конструкции рентгеновского телескопа-спектрометра СКР-02М для исследования временных и спектральных характеристик источников рентгеновского излучения в рамках возможностей станции, ограниченных по продолжительности времени наблюдений. Представлены результаты исследования галактических и внегалактических источников рентгеновского излучения, предусмотренных программой рентгеновского эксперимента на станции «Астрон»: компактных объектов, остатков сверхновых звезд, шаровых скоплений, галактик различных типов и их ядер, квазаров, пульсаров, барстеров.

**Ключевые слова:** космические исследования, Крымская астрофизическая обсерватория, космическая станция «Астрон», рентгеновские исследования.

**Введение**

Изучение небесных объектов в рентгеновском диапазоне длин волн считалось приоритетным направлением астрофизических исследований, поскольку установление некоторых характеристик рентгеновского излучения звезд и ядер галактик давало возможность получить сведения о природе явлений и процессов, протекающих в пространстве вблизи поверхности данных объектов. Начиная с 70-х гг. XX ст. большинство научных результатов в области рентгеновской астрономии получено благодаря применению искусственных спутников Земли и орбитальных пилотируемых станций, на которых устанавливались счетчиковые телескопы с механическими коллиматорами различной конструкции. Ученые КрАО АН СССР, используя возможность участия в программе «Астрон», разработали и установили на борту астрофизической станции рентгеновский телескоп-спектрометр СКР-02М для исследования временных и спектральных характеристик источников рентгеновского излучения в рамках возможностей станции, ограниченных по продолжительности времени наблюдений.

**Результаты исследования**

Оптический прибор состоял из двух идентичных устройств детектирования и 10 электронных блоков. Сеансы наблюдений рентгеновских источников проводились в

режиме непосредственной передачи телеметрической информации с борта «Астроны» на наземный пункт приема и обработки данных. Применение отечественными учеными именно такой методики позволило в реальном времени проводить экспрессную обработку результатов наблюдений, используя определенный набор алгоритмов первичной обработки, с представлением данных в виде графиков, машинных распечаток, визуализированных данных. Параллельно необработанная информация записывалась на магнитный носитель. В момент включения спектрометра контролировалась подача бортсети по каждому из шести фидеров питания, наличие высокого напряжения на детекторах, величина любого параметра. Такой анализ позволил оперативно судить о состоянии систем спектрометра и носить изменения в ход сеанса. Экспресс-обработка данных СКР-02М, которая выполнялась на терминальной станции Института космических исследований АН СССР, предоставляла предварительные результаты по оценке работоспособности спектрометра в целом, выделяла наиболее интересные участки информации для первоочередной и более полной обработки. На терминальной станции Института космических исследований АН СССР формировался полный массив информации для вторичной обработки на электронно-вычислительной машине серии ЕС.

Комплект программ экспресс-обработки включал следующие программные модули:

- 1) получение массива данных в формате М-6000 на двух магнитных лентах;
- 2) получение массива данных в формате ЕС электронно-вычислительной машины на двух магнитных лентах;
- 3) обработка, формирование и распечатка аналоговых параметров научной информации прибора СКР-02М;
- 4) обработка, формирование и распечатка информации по 11 цифровым параметрам СКР-02М;
- 5) обработка, формирование и распечатка параметров контроля исполнения команд прибора СКР-02М;
- 6) контроль структуры поступающей информации с регистрацией данных на цифровой печати (Астрофизические исследования..., 1994).

Перед каждым отдельным сеансом наблюдений предоставлялась возможность выбора необходимых программных модулей для формирования их набора. Во время сеанса по результатам текущей обработки можно было подключать или выключать отдельные модули. После проведения каждого наблюдения выполнялся анализ качества полученной информации. На этом этапе выявлялись грубые сбои в работе наземных систем регистрации данных и ввода их в вычислительную машину. После оценки качества вся информация проходила этап первичной обработки. При первичной обработке восстанавливалась структура телеметрической информации с маркировкой сбойных телеметрических кадров. Анализ информации, полученной в сеансах, свидетельствовал о том, что на графиках зависимости скорости счета в спектральных каналах от времени наблюдения иногда наблюдались выбросы, похожие на сбойные значения. Для устранения подозрительных точек данные наблюдений фильтровались: каждое измеренное значение скорости счета сравнивалось со значением, полученным путем экстраполяции на момент изменения зависимости скорости счета от времени для предшествующих точек. Определение энергетических спектров наблюдаемых источников проводилось путем сравнения наблюдений с модельными спектрами, искаженными функцией отклика прибора. Для этого строилась математическая модель прибора. Для обработки данных пульсаров была подготовлена программа перехода от времени регистрации событий на спутнике к времени, отнесенному к барицентру Солнечной системы, что позволяло сравнивать между собой данные разных исследователей, полученные в разное время.

Согласно программе рентгеновского эксперимента, на станции «Астрон» астрофизиками исследовались характеристики галактических и внегалактических источников рентгеновского излучения: компактных объектов, остатков сверхновых звезд, шаровых скоплений, галактик различных типов и их ядер, квазаров, пульсаров, барстеров (Боярчук и др., 1987; Боярчук, Гершберг, Проник, 2007). Перед учеными были поставлены следующие задачи по изучению временных характеристик:

1) определение периодов рентгеновских пульсаров в диапазоне  $3 \times 10^{-3}$ –  $3 \times 10^3$  с (Астрофизические исследования..., 1994);

2) регистрация всплесков рентгеновского излучения от барстеров;

3) определение интегрального потока излучения в исследуемом диапазоне энергий для сравнительного сопоставления с результатами измерений в различные время другими группами экспериментаторов;

4) проведение спектральных исследований для источников, поток от которых надежно фиксировался не менее чем в пяти каналах десятиканального амплитудного анализатора прибора.

В ходе наблюдений возникли обстоятельства, которые повлекли за собой внесение дополнений в научную программу. К таковым относилось установление точной локализации на небе отдельных источников при затмении их Луной, изучение предложенных советскими и зарубежными астрономами, работающими в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах, ранее не включенных в программу объектов. С учетом всех дополнений сотрудниками КрАО АН СССР составлен каталог, включающий в себя около 1000 источников.

За пятилетний период (1983–1987 гг.) работы телескопа-спектрометра было проведено 155 сеансов, в которых осуществлялись рентгеновские исследования. Общее время работы аппаратуры составило 650 ч. Специалистами изучено 69 различных объектов, среди которых 8 вспыхивающих источников (барстеров), 15 рентгеновских пульсаров, 21 сильнопеременный источник, 25 слабых источников (Боярчук и др., 1988). Некоторые из числа вышеуказанных изучались многократно: источник Крабовидная туманность (Tau X-1) наблюдался 6 раз, транзиентный источник A0535+26 – 8 раз, барстер MXB1730–335 – 9 раз, пульсар Геркулес X–1 (Her X–1) – 10 раз (Астрофизические исследования..., 1994). Согласно отчету за пятилетний период работы «Астрона», некоторые исследования рентгеновских источников, такие как пульсар A0535+26, звезда RULup, звезда BD 3711–46, источник гамма-всплесков, проводились в кооперации с наземными обсерваториями СССР и зарубежных стран, а также с международным ультрафиолетовым спутником «IUE» (Боярчук и др., 1988).

Перед осуществлением масштабных исследований с помощью телескопа СКР-02М в космическом пространстве были проведены проверочный и юстировочный сеансы. 1 апреля 1983 г. во время первого включения телескопа проверялась его работоспособность: последовательно включались блоки детектирования и системы рентгеновского спектрометра. Ось спектрометра наводилась в точку, где отсутствовали источники рентгеновского излучения. В ходе проверочного сеанса установлен оптимальный режим работы инструмента, оценен уровень фона от заряженных частиц и уточнено функционирование аппаратуры при подаче основных команд управления рентгеновским спектрометром. Во время юстировочного сеанса, длившегося около часа, определялась параллельность осей рентгеновского телескопа-спектрометра и системы астроориентации станции. Спектрометр наводился на калибровочный источник в созвездии Тельца – Tau X-1, на точечный стабильный во времени объект, спектр которого хорошо изучен. В его излучении была 10-процентная пульсирующая компонента – излучение пульсара NP 0532 с периодом 0,033 с. Ось рентгеновского телескопа наводилась на туманность и отводилась от нее в точки, удаленные на  $6^\circ$ , четыре раза. Полученные данные позволили настроить программу вычисления спектра

источников и определить эффективную площадь инструмента, которая составила  $1700 \text{ см}^2$  (Курт, Шеффер, 1984). Также испытывался канал регистрации быстропеременного излучения пульсара NP 0532. Такого рода тестовые наблюдения пульсара в Тау X-1 проводились ежегодно. Характеристики пульсара NP 0532 применялись для слежения за всеми изменениями характеристик рентгеновской аппаратуры, в том числе для проверки стабильности чувствительности спектрометра, постоянства порогов спектральных каналов, расположения осей системы ориентации и стабилизации космической обсерватории с оптической осью спектрометра, контроля систем снижения фона. За 5 лет работы установлено медленное возрастание фона от 300 до 750 имп/с, что объяснялось изменением солнечной активности и характеристик аппаратуры. Дрейф порогов спектральных каналов не превысил 20%. К 1988 г. чувствительность рентгеновской аппаратуры снизилась вдвое. После юстировочного сеанса начались плановые исследования рентгеновских источников.

Как уже указывалось выше, наблюдения Тау X-1 осуществлялись с целью калибровки и юстировки рентгеновского телескопа-спектрометра. При построении энергетического спектра излучения объекта использовались данные скорости счета во всех десяти энергетических каналах. При построении кривой блеска пульсара NP 0532 использовались данные скорости счета в канале быстрого опроса. Окончательным результатом обработки данных стало установление барицентрического периода пульсара NP 0532 на момент начала наблюдения, а также кривая блеска пульсара или его периодограмма. При исследовании рентгеновского потока от Тау X-1 на некоторое время отключалось устройство дискриминации фронта нарастания с целью оценки эффективности и коэффициента пропускания этой схемой полезного сигнала от рентгеновских фотонов. Усредненное значение пропускания устройства дискриминации фронта нарастания во всем энергетическом диапазоне составляло не менее 90 % полезного сигнала, в пять раз снижает уровень фона от заряженных частиц. Средняя скорость счета в диапазоне энергий 2–25 кэВ от источника Тау X-1 составила 3200 имп/с (Астрофизические исследования..., 1994). В результате анализа ранее полученных значений и рентгеновских данных со станции «Астрон» отечественные ученые сделали предположение, что в период с 1976 г. по 1984 г. не происходило больших скачков в периоде пульсара NP 0532. Специалистами установлено влияние пульсирующей компоненты на полное излучение, регистрируемое от Тау X-1. Эта величина определялась как отношение числа импульсов, принимаемых от пульсара NP 0532, к полному числу импульсов, зарегистрированных от туманности, включая сигнал от пульсара. Вклад пульсара составил  $8,4 \pm 0,8$  % в диапазоне от 2 до 25 кэВ, что соответствовало результатам более ранних проектов (Астрофизические исследования..., 1994).

Многokrратному исследованию на астрофизической станции в рамках координированной международной программы подвергся рентгеновский пульсар A0535+26. Основной режим, который применяли ученые, – режим трехосной ориентации оси прибора на источник. Изучение объекта проводилось и во время выполнения других наблюдательных программ, в частности 1 и 4 февраля 1984 г. исследовался во время сканирования небесной сферы (Астрофизические исследования..., 1994). Пульсар A0535+26 наблюдался в двух его состояниях: данные от 25 октября 1983 г. соответствовали периоду падения рентгеновского потока объекта, результаты от 20 февраля 1987 г. свидетельствовали о подъеме общего потока рентгеновского излучения. На протяжении двух часов наблюдался рост сигнала от источника с 9 mCrab до 25 mCrab (Астрофизические исследования..., 1994). В активном состоянии пульсирующая компонента излучения выделяется достаточно хорошо, при низком уровне потока от источника кривая блеска пульсара отличалась от кривой при высоком уровне потока. При высоком уровне потока абсорбционные детали



на кривой блеска значительно шире и глубже, чем при низком уровне. Согласно многолетним данным наблюдений КраО АН СССР с 1983 г. период рентгеновского потока возрос. Такое поведение пульсара ученые объясняли тем, что значительное ускорение пульсара происходило в моменты ярких вспышек источника, когда поток достигал или превышал уровень в 1 Crab. В промежуточные периоды, когда яркость источника во время вспышек не превосходила 0,5 Crab, ускорение пульсара было либо незначительное, либо не происходило вообще. В период с 19 апреля 1985 г. по 17 марта 1986 г. телескоп-спектрометр не зафиксировал увеличение рентгеновского потока от A0535+26. Ученые пришли к выводу о нахождении пульсара в пассивном состоянии, что могло быть вызвано резким падением темпа аккреции вещества на нейтронную звезду в момент прохождения ею периастра звездной системы. Поэтому период объекта не изменился. Исследователи придерживались мнения о существовании периода между мощными вспышками источника A0535+26, длительностью 1000–1100 дней.

Еще один объект рентгеновских исследований – пульсар Центавр X-3 (Cen X-3) – изучался астрофизиками 4 раза общей длительностью 8–12 ч. 18 января 1984 г. импульсы от источника не зафиксированы, что свидетельствовало о его довольно частом пассивном состоянии. В остальных 3 сеансах импульсный сигнал виден четко. Ситуация, когда в 1984 г. ускорение вращения нейтронной звезды сменилось замедлением, считалась нестандартной для пульсара и протекала до 1985 г.

Объект пульсар Геркулес X-1 (Her X-1), двойная система, оптический компонент которой – переменная звезда NZ Геркулеса, а рентгеновский – нейтронная звезда, наблюдался в 1983–1987 гг. в 6 сеансах. Проводились спектральные исследования в диапазоне 2–25 кэВ, изучались временные характеристики в разных фазах 35d-цикла (Боярчук, Моисеев, 2013). Установлено, что характерная форма главного импульса с двумя пиками и ее вариации с 35d-периодом обусловлены затенением диска области генерации рентгеновского излучения. Наблюдения 30 июня 1983 г. были запланированы в ожидаемом максимуме рентгеновского потока. Однако зарегистрированный поток в диапазоне 2–25 кэВ составил лишь  $8,8 \cdot 10^{-3}$  имп/ (см<sup>2</sup>×с) (~5 mCrab), что почти в 20 раз ниже его типичного максимального значения (Астрофизические исследования..., 1994). То есть сигнал от яркого и хорошо изученного источника Her X-1 не получен. Состояние низкой активности объекта подтвердили и наблюдения с европейского спутника «Exosat». Была предпринята попытка выделить пульсирующую компоненту излучения, однако удалось получить лишь верхний предел этой компоненты, которая не превышала 0,7 %. Одновременно специалисты установили, что кривая блеска переменной NZ Геркулеса практически не изменилась. Минимальное изменение блеска данной звезды объяснялось переработкой в звездной фотосфере рентгеновского излучения нейтронной звезды. Это означало, что излучение нейтронной звезды, входящей в двойную пару, осталось прежним, а изменилось состояние окружающего нейтронную звезду газового диска, из которого вещество переносилось на нейтронную звезду (аккреционный диск). Иными словами, в состоянии низкой активности, возникающем у Her X-1 дважды за период 35d, наблюдалось не прямое излучение от нейтронной звезды, а отраженное и рассеянное излучение. Таким образом, ученые сделали вывод о том, что спектр в низком состоянии переменен. В нем появлялся и исчезал локальный максимум вблизи 15 кэВ. Однако на низких энергиях от 1 до 10 кэВ спектр всегда степенной, хотя показатель степени изменялся в широких пределах.

Астрофизиками изучались вариации структуры кривой блеска пульсара Her X-1. Согласно полученным результатам при достаточно стабильной структуре главного импульса наблюдались заметные изменения его формы. Было установлено, что профиль импульса не изменялся с фазой орбитального движения в двойной звездной системе. Специалистами выявлена зависимость вида кривой блеска пульсара от

энергии. Профиль главного импульса на более высоких энергиях (18–72 кэВ) имел простую форму с одним пиком. Максимум сдвинут относительно первого пика на низких энергиях и совпадал с его задним фронтом. В мягком рентгеновском диапазоне (0,1–1 кэВ) кривая блеска пульсара сильно отличалась от кривой в жесткой области (Астрофизические исследования..., 1994). Кривая блеска при низких энергиях в разных экспериментах приобретала различную форму, что отличалось от кривой при высоких энергиях. В этом состоянии структура главного импульса, состоящего из двух пиков разной амплитуды, имела устойчивую повторяемость во всех экспериментах в различные эпохи наблюдений. Наблюдательный факт различия кривых блеска в разных состояниях активности считался необходимым для построения адекватной модели механизма 35d-цикла активности пульсара.

Наиболее интересным и наименее изученным вопросом для отечественных ученых оставалось существование 35d-цикла активности Her X-1. Согласно гипотезе астрофизиков, магнитный полюс в состояниях низкой и высокой энергий объекта имел существенные отличия. Этим объяснялся фазовый сдвиг на  $180^\circ$  момента появления главного импульса на кривой блеска вследствие сложной картины отражения и рассеяния квантов на внутреннем крае аккреционного диска. Согласно модели пульсара Her X-1, разработанной сотрудниками КрАО АН СССР, во время фазы падения интенсивности в состоянии высоких энергий 35d-цикла первый пик главного импульса ослаблялся больше, чем второй. В свою очередь, интеримпульс ослаблялся меньше, чем пики. Такое изменение объяснялось тем, что область генерации постоянно частично затенялась внутренним краем диска, который в модели прецессировал в направлении вращения нейтронной звезды и орбитального движения. Внутренний край диска находился около поверхности нейтронной звезды и перехватывал до 70–80 % первичного потока, рассеивал и поглощал его (Астрофизические исследования..., 1994). Поглощенная часть потока перерабатывалась в жестком рентгеновском диапазоне. Вблизи данного края формировался мощный поток флуоресцентного излучения в  $K\alpha$ -линии железа. Поскольку обращенный к наблюдателю внутренний край диска в картинной плоскости располагался выше верхнего лимба нейтронной звезды в состоянии высоких энергий, то излучение от него принималось дольше при почти полном затенении области генерации, расположенной на поверхности нейтронной звезды.

Исследователями обсерватории неоднократно изучались вспыхивающие источники, причиной вспышек которых являлся ядерный взрыв вещества, накопившегося на поверхности нейтронной звезды. К таковым относилась двойная система МХВ 1733-35, состоящая из нейтронной звезды и красного карлика, в которой не наблюдались рентгеновские и оптические затмения. За шестимесячный период наблюдений барстер изменял характер излучения 3 раза: зарегистрированы всплески разного типа и различной длительности. 16 августа 1983 г. оптическими приборами с борта станции «Астрон» зафиксировано затмение МХВ 1733-35 Луной (Курт, Шеффер, 1984). На расстоянии близко  $0,5^\circ$  от исследуемого объекта зафиксирован барстер МХВ 1728-34, испускавший одновременно и постоянное рентгеновское излучение. Телескоп-спектрометр принимал суммарный сигнал двух источников. При затемнении МХВ 1733-35 отмечено резкое падение сигнала. После перемещения объекта из-за края Луны сигнал восстановился до первоначального уровня. На основании полученных результатов астрофизики сделали следующий вывод: во время наблюдения от МХВ 1733-35 вместо отдельных коротких импульсов поступало постоянное излучение. Затмения рентгеновских источников позволили уточнить координаты не отождествленных с оптическими объектами структур.

## Выводы

Полученные учеными КрАО АН СССР сведения об испытываемых небесных телах позволили установить их структуру, объяснить физические явления, которые происходили в объектах. Наблюдения в рентгеновском диапазоне с помощью телескопа-спектрометра СКР-02М предоставили сведения о 69 различных объектах. Для пульсаров Центавр X-3, Геркулес X-1, NP 0532 определены их периоды, в барстере МХВ1730-335 зарегистрированы всплески рентгеновского излучения, исследована Крабовидная туманность Тау X-1 с целью калибровки и юстировки рентгеновского телескопа-спектрометра.

## Список литературы

1. Астрофизические исследования на космической станции «Астрон» / Под ред. А.А. Боярчука. – М.: Физматлит, 1994. – 416 с.
2. Боярчук А.А. Моишеев А.А. 30 лет первой отечественной астрофизической станции «Астрон» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. – 2013. – № 3. – С. 3–7.
3. Боярчук А.А. Гершберг Р.Е., Проник В.И. Космический эксперимент Астрон // Известия КрАО. – 2007. – Т. 103. – № 2. – С. 54–65.
4. Боярчук А. А. Наблюдения на «Астроне»: сверхновая 1987А в большом Магеллановом облаке/ А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг, А. М. Зверева, П. П. Петров, А. Б. Северный, А. В. Теребиж и др. // Письма в Астрон. журн. – 1987. – Т. 13. – № 9. – С. 739–743.
5. Боярчук А. А. Орбитальная астрофизическая обсерватория «Астрон». Итоги 5 лет работы / А. А. Боярчук, Е. Д. Гернет, Р. Е. Гершберг, П. П. Петров, А. М. Зверева и др. // Космические исследования. – М.: Наука, 1988. – Т. 26. – Вып. 6. – С. 917–933.
6. Курт В.Г., Шеффер Е.К. «Астрон»: рентгеновский эксперимент // Земля и Вселенная. – 1984. – № 2. – С. 26–34.

## RESEARCH OF SCIENTISTS OF THE CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY OF THE AS USSR IN THE X-RAY RANGE OF WAVE LENGTHS AT THE ASTRON SPACE STATION

**Shcherbina A.D.**

*Administration of the Russian Academy of Sciences for Interaction with Scientific Organizations of the Republic of Crimea and the City of Federal Significance in Sevastopol, Nikita, Yalta, Russian Federation, e-mail: [aas175740@yandex.ru](mailto:aas175740@yandex.ru), [aas@iki.rssi.ru](mailto:aas@iki.rssi.ru)*

Research work of scientists of the Crimean astrophysical observatory of Academy of Sciences of the USSR at space station «Astron» in one of the priority directions of astrophysical researches – x-ray astronomy is covered in article. Features of a design of the x-ray СКР-02М telescope-spectrometer for research of temporary and spectral characteristics of sources of x-ray radiation within the opportunities of station limited on duration of time of supervision are established. Results of research of the galactic and extragalactic sources of x-ray radiation provided by the program of x-ray experiment at «Astron» station are presented: compact objects, remains of supernew stars, spherical congestions, galaxies of various types and their kernels, quasars, pulsars, barsters.

**Key words:** space research, Crimean Astrophysical Observatory, Astron space station, X-ray studies.

*Поступила в редакцию 10.04.2018 г.*