

# ВЫСОКОТОЧНЫЕ АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ НА РТТ-150 ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ

© 2023 г. И. М. Хамитов<sup>1,2\*</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Академия наук Татарстана, Казань, Россия

Поступила в редакцию 13.03.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.; принята к публикации 28.03.2023 г.

Российско-Турецкий 1.5-м телескоп (далее РТТ-150) принимает активное участие в работе по наземной оптической поддержке наблюдений российской космической обсерватории Спектр—Рентген—Гамма (с участием Германии) с целью отождествления и классификации новых рентгеновских источников, обнаруживаемых телескопами СРГ. Инструментальные возможности РТТ-150 (изредка, без существенного использования телескопного времени и ущерба для астрофизических программ) используются в астрометрических наблюдениях для контроля коррекции орбиты самой космической обсерватории (КО) СРГ. В этих случаях РТТ-150 обеспечивает Баллистический центр Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН высокоточными астрометрическими измерениями положения обсерватории СРГ, которые используются в задачах по успешному удержанию ее на рабочей орбите в течение вот уже более трех лет ее эксплуатации. Начиная со стадии перелета в зону точки  $L_2$  в июле 2019 г. и на основном этапе миссии обзора всего неба по март 2023 г., на наблюдательном комплексе РТТ-150 проведены 96 сетов (продолжительностью около 30 мин каждый) высокоточных позиционных наблюдений с более 5000 астрометрических и фотометрических измерений. Позиционная точность измерений, зависящая от качества изображения и видимого блеска СРГ, согласуется в большинстве случаев с точностью предоставляемых эфемерид в 0.10 и 0.15 угл. сек по склонению и по прямому восхождению соответственно. В летние месяцы в проекции на центральную область Галактики в экстремально богатых источниками полях точность астрометрии составляет 1 угл. сек, достаточную для обнаружения СРГ после проведения коррекций и последующих уточнений ее траектории. Географически РТТ-150 является самым южным инструментом из российских телескопов наземной астрофизической поддержки СРГ. Данное обстоятельство исключительно важно и при позиционных наблюдениях КО СРГ при самых низких положениях по склонению  $DEC \sim -30^\circ$ . В работе представлены результаты астрометрических и фотометрических наблюдений на РТТ-150, использованная методика обработки астрометрических данных в различных полях вплоть до экстремально богатых источниками.

*Ключевые слова:* оптические наблюдения, фотометрические и позиционные наблюдения космических обсерваторий, телескопы: РТТ-150, космические обсерватории: СРГ.

**DOI:** 10.31857/S0320010823030038, **EDN:** CRDZRD

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Космическая обсерватория Спектр—Рентген—Гамма (СРГ)— это первая космическая миссия России, работающая в окрестности коллинеарной солнечно-земной точки либрации  $L_2$ , которая расположена на расстоянии приблизительно 1.5 млн км от Земли в сторону, противоположную

от Солнца на линии Солнце—Земля. Кроме обсерватории СРГ в области  $L_2$  в настоящее время активно работают еще две замечательные астрофизические обсерватории — оптическая КО GAIA<sup>1</sup> Европейского космического агентства и инфракрасная КО JWST<sup>2</sup> Национального управления по аэронавтике и исследованию космического про-

\*Электронный адрес: irek\_khamitov@hotmail.com

<sup>1</sup><https://sci.esa.int/web/gaia/home>

<sup>2</sup><https://webb.nasa.gov>

странства (США). Орбита JWST, так называемая гало-орбита, во многом похожа на орбиту СРГ<sup>3</sup>. Длительность любой космической миссии при всех благоприятных условиях зависит от расхода рабочего тела, используемого для управления КО. В случае с СРГ имеются два постоянных источника таких расходов — это, во-первых, удержание аппарата на квазипериодической гало-орбите и, во-вторых, выполнение научной задачи по исследованию рентгеновских источников, т.е. управление ориентацией платформы с телескопами. Используемая в управлении обсерватории СРГ стратегия маневров в определенных ориентациях ракетных двигателей по отношению к положению на орбите позволяет минимизировать общий расход рабочего тела (Эйсмонт и др., 2020). Включение же в состав траекторных измерений, наряду с радиотехническим оборудованием и методами, высокоточных позиционных наблюдений на оптических телескопах позволило радикально повысить точность траекторных параметров и, следовательно, более точно предвычислять необходимую амплитуду дополнительных импульсов при вышеперечисленных маневрах. Российско-Турецкий телескоп РТТ-150 с диаметром зеркала 1.5-м эпизодически и не в ущерб основным астрофизическим программам по наземной поддержке в идентификации источников СРГ используется в позиционном мониторинге КО СРГ. В данной работе представлены результаты астрометрического и фотометрического мониторинга КО СРГ на протяжении 3.5 лет со второй половины июля 2019 г. и по март 2023 г., выполненные на РТТ-150. Также представлены использованные методы обработки данных в различных полях вплоть до экстремально богатых источниками.

## ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В соответствии с основными научными задачами РТТ-150, подавляющая часть наблюдательного времени в российской квоте, начиная с января 2020 г., используется для оптических отождествлений и классификации новых, ранее неизученных, рентгеновских источников, обнаруживаемых телескопами СРГ в ходе обзоров всего неба, среди них — тесные двойные системы, далекие квазары, массивные скопления галактик и др. (<https://www.roscosmos.ru/srg/>). Авторы статьи принимают активное участие в решении этих астрофизических задач совместно с коллегами ИКИ РАН и других астрономических учреждений РФ. Первые результаты этих исследований были опубликованы в работах Бикмаева и др. (2020–2022) и Хамитова и др. (2022а,б). При этом инструментальные возможности РТТ-150 (см. далее)

позволяют также выполнять высокоточные астрометрические наблюдения СРГ с целью контроля коррекции его орбиты и удержания обсерватории на расчетной орбите.

Астрометрические наблюдения СРГ, выполнявшиеся на Российско-Турецком 1.5-м оптическом телескопе РТТ-150 (рис. 1), проводились по запросам Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (В.А. Воропаев). РТТ-150 включился в позиционный мониторинг КО СРГ уже на третий день после успешного запуска с космодрома Байконур 13 июля 2019 г. До конца марта 2023 г. проведено 96 сетов наблюдений с более 5000 астрометрических и фотометрических измерений (при этом продолжительность каждого сета наблюдений КО СРГ составляет 30–40 мин). На стадии перелета в первый месяц высокоточные позиционные наблюдения проводились практически каждую ночь, охватывая коррекцию К1<sup>4</sup>, вплоть до коррекции К2 и в течение еще нескольких ночей после. Таким образом, оптическими наблюдениями был проведен контроль движения КО СРГ на данном участке и подтверждено удачное выполнение коррекций траектории его орбиты. Замечательно, что после второй процедуры, ввиду великолепного соответствия заданной траектории, отпала необходимость в третьей коррекции, запланированной на 24 августа 2019 г. (рис. 2). Это привело к малым потерям рабочего тела на стадии перелета в зону  $L_2$  (Эйсмонт и др., 2020). После перехода на квазипериодическую гало-орбиту вокруг  $L_2$  (маневр перехода соответствует точке К3) позиционный мониторинг КО СРГ на РТТ-150 проводился с меньшей плотностью, 2–3 раза в месяц.

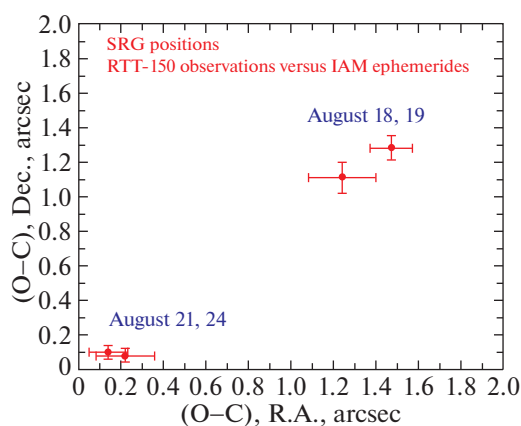
Наблюдения проводились преимущественно в лучших для регистрации условиях, т.е. вблизи меридиана, на зенитных расстояниях от 5° до 69°, но чаще всего в районе 45°. Качество изображений полученных кадров менялось от 1".2 до 2".7, с медианным значением за весь период наблюдений 1".9. Внутри наблюдательного сета получалась серия от 50 до 100 последовательных кадров с экспозицией по 20 с. Время экспозиции подбиралось так, чтобы видимое положение КО СРГ из-за собственного движения оставалось в пределах 1.5 угл. сек, т.е. в пределах медианного значения качества изображения и регистрировались точечные изображения, а с другой стороны, достигалось достаточное отношение сигнала к шуму для астрометрических

<sup>3</sup><https://iki.cosmos.ru/news/observatoriya-spektr-rg-v-kosmicheskom-khorovode>

<sup>4</sup>Обозначения основных коррекций К1, К2 и К3 те же самые, что и на рис. 5 из (Сюняев и др., 2021). Точки К1 и К2 обозначают основные коррекции траектории орбиты. Точка К3 соответствует моменту маневра перехода на квазипериодическую орбиту вокруг  $L_2$ .



**Рис. 1.** Российско-Турецкий телескоп РТТ-150 с основной подвесной аппаратурой ТФОСК — спектрометр и камера для изучения слабых объектов. Диаметр главного зеркала — 1.5-м.



**Рис. 2.** Невязки между измеренными на РТТ-150 экваториальными координатами КО СРГ и эфемеридами Баллистического центра Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, измеренные накануне запланированной на 24 августа 2019 г., но отмененной третьей основной коррекции траектории орбиты (см. текст).

оценок. Таким образом, внутри наблюдательного сети изображение КО СРГ регистрировалось с S/N от 30 до 100, что способствовало при усреднении по ансамблю измерений достигать высокоточных измерений положения КО СРГ порядка 0.05–0.10 угл. сек. Фотометрические оценки блеска КО СРГ в каждом сете наблюдений получились с точностью лучше  $0^m.1$ .

### Наблюдательный комплекс РТТ-150

РТТ-150 расположен в Национальной обсерватории ТЮБИТАК в 50 км к западу от города Анталья в горах Малого Тавра. Телескоп расположен на южной вершине горы Бакырлытепе и соответствует следующим географическим координатам:  $30^{\circ}19'59.9''$  восточной долготы,  $36^{\circ}49'31.0''$  северной широты и 2538.6 м над уровнем моря. РТТ-150

является самым южным из российских телескопов, участвующих в наземной астрофизической поддержке СРГ. Данное обстоятельство делает его одним из ключевых телескопов по позиционным наблюдениям КО СРГ при самых низких положениях по склонению  $DEC \sim -30^\circ$ . Особую важность приобретают наблюдения КО СРГ в первых двух декадах мая каждого года, когда обсерватория, в дополнение к низким значениям по склонению, попадает в наиболее короткие интервалы радиовидимости с российских наземных станций управления (Сюняев и др., 2021). Также в периоды с конца апреля и до начала июля измерения в области  $L_2$  проводятся в проекции на область Млечного Пути в полях, экстремально богатых источниками. В этом случае большие требования предъявляются как к качеству оптики, так и атмосферным условиям. Наблюдательный комплекс РТТ-150 создавался для решения астрофизических задач, связанных с наземной поддержкой рентгеновских обсерваторий (Бикмаев, 2008). Одновременно комплекс развивался и для исследования тел Солнечной системы (Гумеров и др., 2013, 2015). Особое внимание уделялось развитию наблюдательного комплекса для изучения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), километрового размера (Хамитов и др., 2020). Примечательно, что данные АСЗ оказались близки по блеску и заметному собственному движению к аналогичным параметрам при наблюдениях КО СРГ. Данное обстоятельство сказалось на эффективном использовании наблюдательного комплекса РТТ-150 при позиционном мониторинге космической обсерватории.

Наблюдательный комплекс РТТ-150 включает в себя широкий набор возможностей для астрофизических наблюдений, таких как спектроскопия, быстрая фотометрия, поляриметрия. Для задачи позиционного мониторинга СРГ определяющими являются следующие параметры комплекса:

1. Фокус Кассегрена  $F/7.7$ , с эквивалентным фокусным расстоянием 11 611 мм, линейным полем зрения 90 мм и угловым полем зрения 26 мин 40 с (Бикмаев, 2008). Угловое поле зрения, используемое при прямых изображениях, ограничено физическими размерами ПЗС-приемника и составляет 11 на 11 угл. мин.

2. Экспериментально определенная точность астрометрических измерений положений астероидов, которые так же, как и СРГ, значительно меняют видимое положение до нескольких угловых секунд за одну временную минуту, соответствует значению порядка 0.1 угл. сек для объектов до  $18^m$ . Блеск КО СРГ порядка этой величины.

3. Фотометрический предел до  $24^m$  за одну часовую экспозицию в полосе  $R_c$  системы Бесселя.

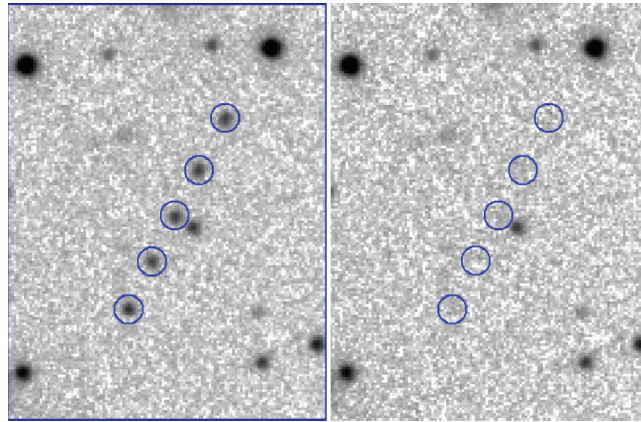
Основным приемником излучения является ПЗС фирмы Андор — Andor iKon L936 VEX2-DD, установленный на РТТ-150 в мае 2019 г., т.е. за два месяца до запуска СРГ. Приемник излучения состоит из  $2048 \times 2048$  пикселей. Линейный размер пикселя ( $13.5 \times 13.5$  мк) в используемой оптической схеме соответствует 0.326 угл. сек на пиксель. Важным параметром данной ПЗС является высокая чувствительность во всем оптическом диапазоне порядка 90%. Кроме того, важной особенностью матрицы является отсутствие интерференционной картины в красной области видимого спектра, так называемых фрингов. Вместе с высокой чувствительностью ПЗС это позволяет получать позиционные снимки таких слабых объектов, как СРГ, без фильтров, т.е. без установки в систему регистрации дополнительных оптических элементов, таким образом повышая принимаемый сигнал и, следовательно, сокращая время экспозиции.

Изображения записываются в широко используемом в астрономии FITS-формате (Вэлс и др., 1981; Пенс и др., 2010), бинарная запись изображения с информативным заголовком (набор ключевых слов).

#### *Астрометрические оценки КО СРГ*

Отождествление источников поля и астрометрическая привязка с записью мировых координат WCS в заголовки FITS-изображений (Грейзен, Калабретта, 2002) осуществляется с помощью собственного ПО, использующего библиотеку IDL/ASTROLIB<sup>5</sup>. В основе алгоритма идентификации источников в двух списках (исследуемом и каталожном) используется подобие треугольников: пропорциональность ребер при одной из вершин треугольника и равенство угла, образуемого этими сторонами. Кроме того, для исключения тождественности треугольников на разных масштабах используется заранее заданный размер пикселя при построении тангенциальной проекции небесных координат источников опорного каталога. Таким образом, для трех источников в исследуемом списке строится вектор с тремя элементами  $V(a_1, a_2, a_3)$ , где  $a_1 - R_{12}$  расстояние между 1 и 2 источниками в пикселях,  $a_2 - R_{13}/R_{12}$  отношение расстояний от первого источника до третьего и второго соответственно, а  $a_3 - \alpha_{\angle 213}$  угол при вершине у первого источника. Для каждой тройки источников из опорного списка строятся вектора  $C(b_1, b_2, b_3)$  с теми же самыми элементами. Минимум функции  $F = \sum_{i=1}^3 (a_i/b_i - 1)^2$  определяет искомую тройку источников в опорном списке.

<sup>5</sup><https://idlastro.gsfc.nasa.gov/>



**Рис. 3.** Астрометрия в слабо и средне заполненных источниками полях проводилась без предварительной обработки фоновых источников. Левая панель — сумма из шести изображений, положение КО СРГ отмечено синими кружочками. Правая панель — медианное изображение из тех же шести изображений. Видно, что на положениях КО СРГ нет фоновых источников существенного блеска.

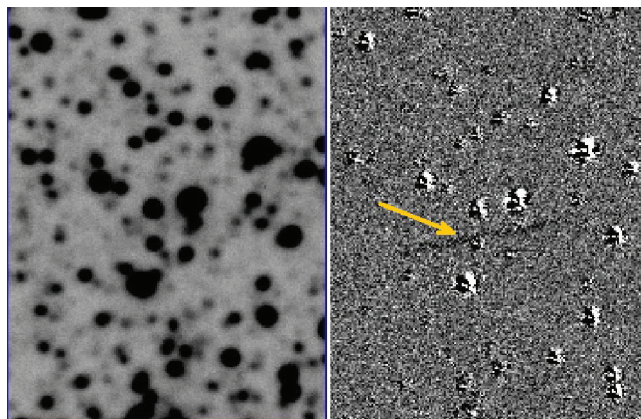
В качестве опорного каталога используется наиболее точный и полный каталог небесных источников с собственными движениями GAIA eDR3 (Браун и др., 2021). Точность наведения РТТ-150 не хуже  $30''$ , поэтому для того, чтобы в опорном списке обязательно присутствовали источники исследуемого списка, из каталога GAIA берутся все источники до  $19^m$  в полосе G либо 100 ярчайших источника, если их число в списке до  $19^m$  больше этого значения, в участке, слегка превышающем размер поля изображения. В нашем случае внутри круга радиусом  $6'$  с центром, соответствующим (RA, DEC) координатам наведения телескопа.

На основе отождествленных трех источников строится астрометрическое решение и записывается в формате WCS в заголовок изображения. Для того чтобы не произошло вырождение решения, когда три источника лежат на одной прямой или незначительно отклоняются от таковой, проводится предварительный отбор источников в исследуемом списке. Для этого все поле разбивается на четыре участка, и в каждой области отбирается самый яркий источник с распределением функции размытия точки (ФРТ), характерным для звезд (см. раздел “Фотометрические оценки блеска КО СРГ”), которая, в свою очередь, зависит от качества изображения и определяется в процессе поиска и фотометрии источников на кадре. Таким образом, выделяются четыре источника, определяющие четыре независимых треугольника. Мы внесли в исследуемый список четыре источника, так как один из них случайным образом может попасть в исследуемый список, но не присутствовать при этом в опорном списке, например, при регистрации объекта Солнечной системы. Для каждой тройки

источников из опорного списка по отношению к четырем тройкам из исследуемого списка строится функция  $F$  и находится искомое минимальное значение. Для ускорения процесса перебора троек, из опорного списка предварительно отбирались пары звезд, удовлетворяющих условию  $|a_1 - b_1| \leq 3$  пиксел ( $\sim 1''$ ).

На основе найденного по трем звездам астрометрического решения (утилита /ASTROLIB/stargast) все источники исследуемого списка со звездным ФРТ отождествляются в опорном списке. После этого строится более точное астрометрическое решение по большему числу источников в поле методом наименьших квадратов с исключением из решения выбросов (утилита /ASTROLIB/astrom). В данных утилитах для поиска связи между измеренными и идеальными координатами реализован алгоритм поиска шести коэффициентов уравнений Тэрнера. Ввиду малого размера поля ПЗС-приемника, а также высокого качества оптических свойств телескопа, влияние на астрометрическую редукцию членов второго порядка мало и не учитывалось.

Методика позиционных оценок КО СРГ зависит от заполненности поля источниками. Для слабо и средне заполненного случая, как на рис. 3, положение оценивается без предварительной обработки фона. В таких случаях в большом числе кадров данного сета внутри апертуры, по которой находится средневзвешенное по интенсивности положение КО СРГ, не имеется достаточно ярких паразитных источников, влияющих на результаты оценок. В полях с экстремальным заполнением фоновых источников их влиянием уже нельзя пренебречь. В данных случаях для повышения контраста между



**Рис. 4.** Астрометрия в экстремально заполненных источниками полях. Для повышения контраста используется метод оптимального вычитания изображений (Алард, Лаптон, 1998; Миллер и др., 2008). Левая панель — суммарное изображение поля, экстремально богатое источниками. Правая панель — то же самое изображение, но с учетом вычета высокочастотной переменности фона методом оптимального вычитания изображений. Хорошо виден след от КО СРГ в виде темной полосы.

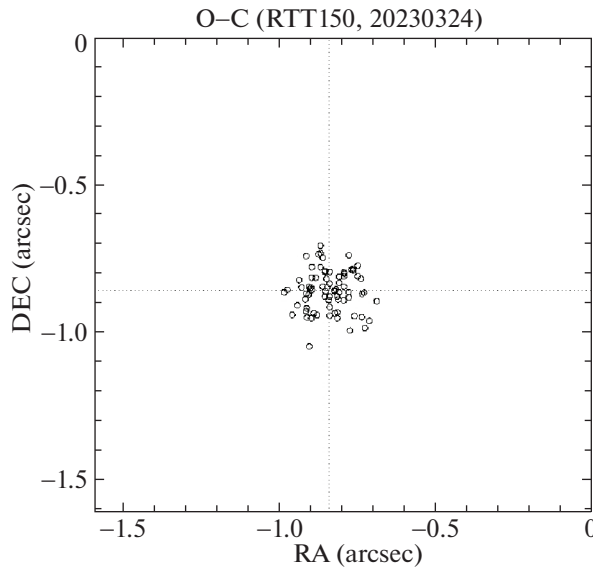
изображением КО СРГ и фоном используется метод оптимального вычитания изображений — ОВИ (Алард, Лаптон, 1998; Миллер и др., 2008). Метод ОВИ разработан для выявления переменных, либо быстро движущихся объектов в сложных по распределению интенсивности полях, когда высокочастотная переменность фона сопоставима с ФРТ изображения. Он состоит в том, что каждое изображение ( $I$ ) можно представить, подогнать, как свертку между референтным изображением ( $R$ ) и ядром ( $K$ ):  $I = R \otimes K$ . Тогда в разности между изображением и его подгонкой остается только переменный сигнал либо по блеску, либо по положению. Ядро  $K$  есть линейная комбинация базисных функций:  $K = \sum_{n=1}^N (c_n K_n)$ , коэффициенты которой определяются по заведомо непременным участкам в  $I$  и  $R$  — обычно это изображения изолированных звезд с хорошим накоплением. В нашем случае при проекции КО СРГ на густонаселенные участки Млечного Пути (левая панель на рис. 4) подобрать совершенно изолированный источник для построения полноценного ядра  $K$  не представляется возможным. Однако, поскольку наблюдения внутри сета проводятся на одном и том же инструменте и в близких атмосферных условиях, то в первом приближении можно ограничиться только определением коэффициента при первом члене в линейной комбинации ядра и пренебречь всеми остальными членами. Референтное изображение внутри сета строилось медианной комбинацией пяти лучших по качеству изображений кадров. В итоге на  $R$ -изображении отсутствовало изображение КО СРГ. Коэффициент  $c_1$  находился по более-менее изолированному изображению звезды с сильным накоплением как отношение суммарного

потока в  $5''$  апертуре,  $I$ , к  $R$ -изображению. На правой панели рис. 4 показан результат учета сильно переменного фона методом ОВИ. Для удобства здесь мы показываем суммарный снимок. Хорошо виден след от КО СРГ в виде темной полосы, а также остаточный сигнал на положениях ярких звезд, обусловленный недоучетом больших членов  $K$ -ядра.

После привязки кадров к астрономическим координатам и при необходимости учета переменного фона, положение КО СРГ в сете определялось по следующему алгоритму. Визуальным контролем на первом и последнем кадрах с точностью до пикселя отмечается положение КО СРГ и составляется координатный список. Для составления списка и визуального контроля использовалась программа SAOImage DS9<sup>6</sup>. Далее положения на этих кадрах уточняются программно нахождением центра тяжести внутри  $3''$  апертуры, после чего строится линейная зависимость координат от времени. Поскольку за небольшое время наблюдений в данном сете изменение положения КО СРГ можно принять линейным, то на кадрах внутри сета его примерное положение определяется линейной интерполяцией по времени регистрации кадра, которое также уточняется программно по центру тяжести. Окончательно по эфемеридам строятся невязки ( $O - C$ ) по обеим координатам и исключаются выбросы, которые влияют на определение центра тяжести из-за попадания в  $3''$  апертуру слабых источников, либо крыльев ярких источников.

На рис. 5 показан пример контроля невязок орбиты после выполненной коррекции КО СРГ

<sup>6</sup><https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimages9>



**Рис. 5.** Контроль невязок орбиты КО СРГ по наблюдениям на РТТ-150. Пример контроля орбиты после проведенной коррекции — случай проекции КО СРГ на слабо или умеренно заполненных источниками полях. Наблюдения проводились 24 марта 2023 г. Позиционная точность измерений позволяет регистрировать отклонения от эфемерид (величины  $(O - C)$ ) с амплитудами заметно менее одной угловой секунды по обеим координатам.

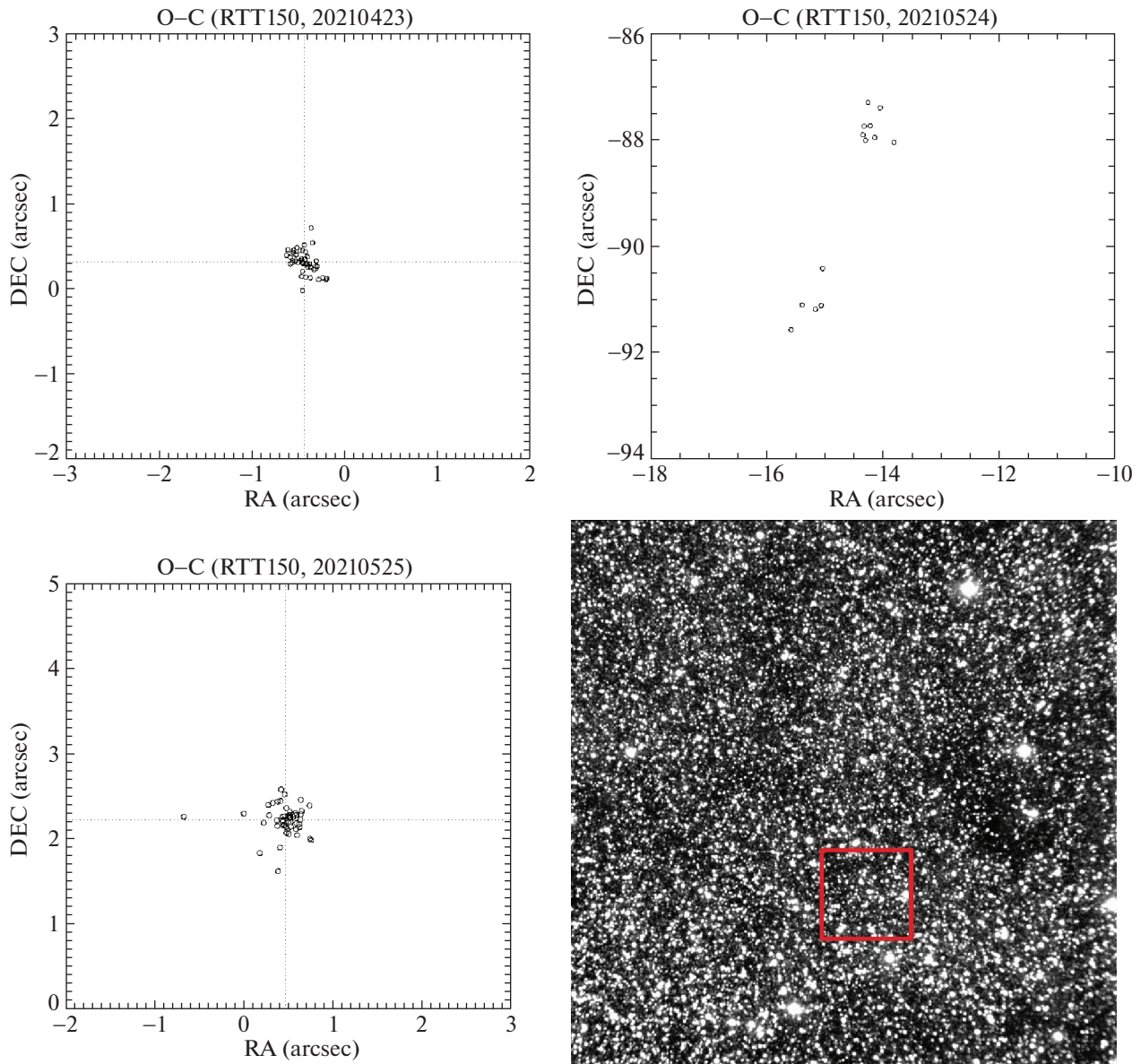
в начале марта 2023 г. Приведен случай проекции КО СРГ на слабо или умеренно заполненные источниками поля. Наблюдения проводились 24 марта 2023 г. Позиционная точность измерений составила  $0.07''$  по обеим координатам.

На рис. 6 показан пример контроля орбиты в период одной из выполненных по сценарию “больших” коррекций КО СРГ в конце мая 2021 г. (Михайлов и др., 2022) — случай проекции КО СРГ на экстремально богатые источниками поля. Наблюдения 23 апреля 2021 г. проводились перед коррекцией (верхняя левая панель), после коррекции 24 мая 2021 г. (верхняя правая панель) и после уточнения орбиты 25 мая 2021 г. (нижняя левая панель). Позиционная точность составила порядка  $0.5''$  во всех сетах наблюдений данного контроля. Помимо сложного фона в этих полях, наблюдения проводились на крайне низких склонениях  $-30^\circ$ ,  $-24^\circ$  и  $-23^\circ$  соответственно. Это обстоятельство заметно влияет на качество изображения из-за наблюдений на малых высотах и, следовательно, на контрастность регистрируемого сигнала (КО СРГ) по сравнению с шумом (высокочастотный переменный фон, образованный звездами на малых галактических широтах). На нижней правой панели показано поле с высокочастотным переменным фоном размером  $11' \times 11'$ , полученное на РТТ-150 24 мая 2021 г. Красным квадратом отмечено место, где после повышения контраста за счет оптимального вычитания изображений был найден КО СРГ в  $\sim 100''$  южнее заданных эфемерид.

#### Фотометрические оценки блеска КО СРГ

Фотометрические оценки блеска КО СРГ не являются основной задачей при позиционном мониторинге и были получены опосредовано, так сказать, *by product*. Однако фотометрические исследования распределения ФРТ источников использовались для процедуры астрономической привязки поля в регистрируемом кадре. Для определения ФРТ звезд нами были использованы кривые роста апертур — AGC (Стетсон, 1990). Для построения кривой роста источника используется набор апертур с равномерным шагом до определенного радиуса, по которым оцениваются потоки в звездных величинах (утилита /ASTROLIB/aper). Далее по каждому радиусу, начиная со второго, находится разница потока на данном радиусе от потока, подсчитанного на предыдущем радиусе. Наименьшая апертура выбирается не менее 2 пиксел (в нашем случае  $0.68''$ ). Экспериментально мы получили, что для качества изображений, получаемых на РТТ-150, достаточно использовать  $4''$  апертуру в качестве максимальной. На рис. 7 показан пример отличия кривой роста апертуры для звезды (линия черного цвета), от аналогичной кривой протяженного источника (линия зеленого цвета). Кривые роста апертур зависят от качества изображения и вычисляются индивидуально для каждого кадра.

Позиционные наблюдения КО СРГ проводились без фильтра в различных атмосферных условиях и в широком диапазоне зенитных расстояний.

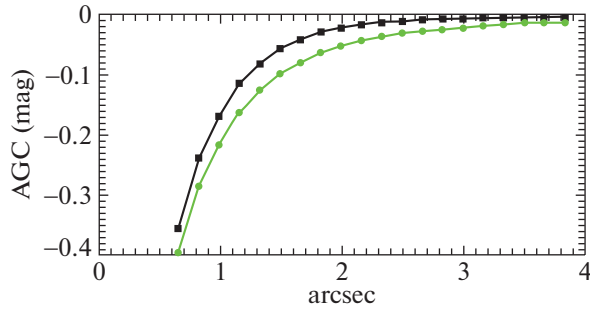


**Рис. 6.** Уточнение орбиты КО СРГ по наблюдениям на РТТ-150. Пример контроля орбиты в период “больших” коррекций КО СРГ в конце мая 2021 г. (Михайлов и др., 2022) — случай проекции КО СРГ на экстремально богатые источниками поля. Наблюдения проводились перед коррекцией 23 апреля 2021 г., после коррекции 24 мая 2021 г. и после уточнения орбиты 25 мая 2021 г. Нижняя правая панель — экстремально богатое источниками поле размером  $11' \times 11'$  (полный размер поля ПЗС-приемника), полученное на РТТ-150 24 мая 2021 г. Красным квадратом отмечено место, где был найден КО СРГ в  $\sim 100''$  южнее эфемерид.

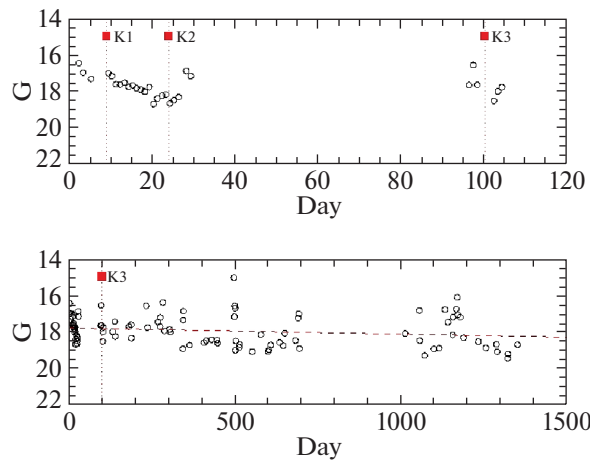
Не задаваясь высокой фотометрической точностью, инструментальные величины можно привести к фотометрической системе  $G$  (Gaia eDR3), ограничиваясь линейной зависимостью от цвета  $BP - RP$  (Gaia) в виде  $G = m_{\text{instr}} + c_0 + c_1(BP - RP)$ . Инструментальные оценки блеска КО СРГ  $m_{\text{instr}}$  оценивались в  $3''$  апертуре. Коэффициенты линейной зависимости ( $c_0, c_1$ ) определялись для каждого кадра индивидуально по звездам GAIA, идентифи-

цированным в поле и удовлетворяющим условиям: пятикратного превышения сигнала по отношению к шуму в собственных движениях либо по прямому восхождению, либо по склонению ( $S/N > 5$ ) и ограниченными по цвету  $(BP - RP) < 2$ . Для оценки блеска КО СРГ в системе  $G$  использовался солнечный показатель цвета  $(BP - RP) = 0.82$ , определенный в работе Касагранде и Вандер-Берг (2018).

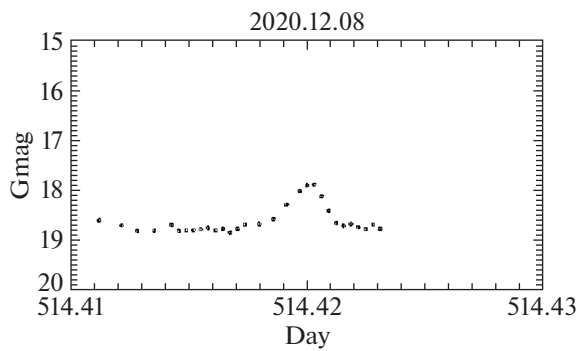




**Рис. 7.** Отличие кривой роста апертур в случае ФРТ для звезды (кривая черного цвета), от протяженного источника (кривая зеленого цвета). По оси абсцисс отложены размеры апертур, по которым оценивались звездные величины источника в угл. сек, а по оси ординат значения кривой роста апертур (AGC), определяемые как разность звездных величин в последовательных апертурах —  $m_i - m_{i-1}$ .



**Рис. 8.** Кривая блеска КО СРГ, полученная по наблюдениям на РТТ-150 без фильтра. Фотометрические оценки приведены к полосе G (Gaia). Верхняя панель соответствует стадии перелета в область точки  $L_2$ . На нижней собраны все данные по март 2023 г.



**Рис. 9.** Кривая блеска КО СРГ, полученная по наблюдениям 8 декабря 2020 г. на РТТ-150 без фильтра. Наблюдается короткое в течение 5 мин поярчание блеска на одну величину. По оси X показано число дней с момента запуска СРГ 13 июля 2019 г.

На рис. 8 показана кривая блеска КО СРГ, полученная за время мониторинга на РТТ-150 по март 2023 г. Верхняя панель соответствует 100-дневному периоду перелета в точку  $L_2$ . Точки К1, К2 и К3, как отмечалось ранее, те же, что и в работе Сюняева и др. (2021). До точки К2 наблюдается монотонное падение блеска, обусловленное удалением аппарата от Земли. Однако после перехода на квазипериодическую орбиту вокруг  $L_2$ , наряду с долгопериодической составляющей из-за движения по орбите, наблюдаются значительные вариации блеска до четырех величин. Понятно, что такое поведение связано с условиями видимости конструкций обсерватории и отражательной способностью отдельных частей, вызывающих подобные блики. Кроме того, ось вращения КО СРГ может составлять угол до  $24^\circ$  с направлением на Землю (Эйсмонт и др., 2020), что вместе с 4-часовым вращением платформы может вызвать короткие, но значительные скачки в блеске. Так, в кривой блеска за 8 декабря 2020 г. было обнаружено увеличение блеска на 1 величину в течение 5 мин (рис. 9). Визуальная инспекция данных кадров не показала наличие источников, сравнимых по блеску с СРГ, в  $3''$  апертуре положений изображения обсерватории.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения траектории КО СРГ с высокой точностью позволяет проводить необходимые маневры с минимальным использованием рабочего тела. Мониторинговые высокоточные позиционные измерения космической обсерватории на оптических телескопах совместно с радиометрическими методами, передающим и принимающим радиооборудованием позволили успешно решать траекторные задачи на протяжении 3.5 лет с момента запуска КО СРГ РТТ-150, с 1.5-м диаметром зеркала, является одним из российских телескопов, используемых в наземной астрофизической поддержке СРГ. В силу своего географического положения этот телескоп является ключевым инструментом при наблюдениях на самых низких склонениях до  $\sim -30^\circ$  в весенне-летний период. Кроме того, этот неблагоприятный период наблюдений с территории России попадает на моменты проекции изображения КО СРГ на экстремально заполненные источниками поля в плоскости Млечного Пути. Особенно важны наблюдения в апреле-мае каждого года в периоды наименьшей радиовидимости с одной из станций сопровождения — Медвежьих Озера. Точность астрометрии, обеспечиваемой наблюдательным комплексом РТТ-150, достигает  $0''.05 - 0''.10$ , что на среднем расстоянии (1.5 млн км от Земли до точки либрации системы Солнце—Земля) области выполнения научной миссии КО СРГ составляет

около 600–800 м. Начиная со стадии перелета в зону точки  $L_2$  в июле 2019 г. и на основном этапе миссии по обзору всего неба по март 2023 г. на наблюдательном комплексе РТТ-150 проведены 96 сетов высокоточных позиционных наблюдений с более 5000 как астрометрических, так и фотометрических измерений.

Авторы благодарны В.А. Воропаеву за предоставленные эфемериды КО СРГ, предвычисленные для наблюдений на РТТ-150, а также Э.Н. Иртуганову за основной вклад в проведении позиционных наблюдений на РТТ-150.

Авторы благодарны ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталии). Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки РФ № FZSM-2023-0015, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, главным образом, для реализации научных задач по астрофизическому отождествлению и классификации рентгеновских источников СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алард, Лаптон (С. Alard and R.H. Lupton), *Astrophys. J.* **503**, 325 (1998).
2. Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А., Сахибуллин Н.А., Гумеров Р.И., Склянов А.С., Глушков М.В., Борисов В.Д. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 689 (2020) [I.F. Bikmaev et al., *Astron. Lett.* **46**, 645 (2020)].
3. Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А., Сахибуллин Н.А., Гумеров Р.И., Склянов А.С., Глушков М.В., Хамитов И.М. и др., Письма в Астрон. журн. **47**, 311 (2021) [I.F. Bikmaev et al., *Astron. Lett.* **47**, 277 (2021)].
4. Бикмаев И.Ф., Колбин А.И., Шиманский В.В., Хамитов И.М., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А., Сахибуллин Н.А., Гумеров Р.И. и др., Письма в Астрон. журн. **48**, 645 (2022) [I.F. Bikmaev et al., *Astron. Lett.* **48**, 530 (2022)].
5. Бикмаев И.Ф., Дисс. доктор физ.-матем. наук, Казань, с. 1–270 (2008).

6. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021).
7. Вэлс и др. (D.C. Wells, E.W. Greisen, and R.H. Harten), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **44**, 363 (1981).
8. Грейзен, Калабретта (E.W. Greisen and M.R. Calabretta), *Astron. Astrophys.* **395**, 1061 (2002).
9. Гумеров Р.И., Хамитов И.М., Пинигин Г.И., Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. наук **155**, 164 (2013).
10. Гумеров и др. (R.I. Gumerov, I.M. Khamitov, L.A. Hudkova, N.V. Maigurova, G.I. Pinigin, O.M. Kochetova, et al.), *Kinemat. Phys. Celest. Bodies* **31**, 286 (2015).
11. Касагранде, ВандерБерг (L. Casagrande and D.A. Vandenberg), *MNRAS* **479**, L102 (2018).
12. Миллер и др. (J.P. Miller, C.R. Pennyacker, and G.L. White), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **120**, 449 (2008).
13. Михайлов Е.А., Аксенов С.А., Заславский Г.С., Мжельский П.В., Погодин А.В., Письма в Астрон. журн. **48**, 61 (2022) [E.A. Mikhailov et al., *Astron. Lett.* **48**, 55 (2022)].
14. Пенс и др. (W.D. Pence, L. Chiappetti, C.G. Page, R.A. Shaw, and E. Stobie), *Astron. Astrophys.* **524**, id.A42 (2010).
15. Стетсон (P.B. Stetson), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **102**, 932 (1990).
16. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babushkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132, 29 (2021).
17. Хамитов и др. (I.M. Khamitov, R.I. Gumerov, I.F. Bikmaev, S.S. Melnikov, E.N. Irtuganov, G. Okuyan, et al.), *INASAN Sci. Rep.* **5**, 61 (2020).
18. Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., Медведев П.С., Горбачев М.А., Иртуганов Э.Н., Письма в Астрон. журн. **48**, 828 (2022a) [I.M. Khamitov et al., *Astron. Lett.* **48**, 724 (2022a)].
19. Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Лыскова Н.С., Круглов А.А., Буренин Р.А., Гильфанов М.Р., Гроховская А.А., Додонов С.Н. и др., Письма в Астрон. журн. **48**, 3 (2022b) [I.M. Khamitov et al., *Astron. Lett.* **48**, 1 (2022b)].
20. Эйсмонт Н.А., Коваленко И.Д., Назаров В.Н., Назиров Р.Р., Коротков Ф.В., Погодин А.В. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 292 (2020) [N.A. Eismont, I.D. Kovalenko, V.N. Nazarov, R.R. Nazirov, F.V. Korotkov, A.V. Pogodin, et al., *Astron. Lett.* **46**, 263 (2020)].