

## ОБНАРУЖЕНИЕ АЯГ И КВАЗАРОВ СО ЗНАЧИМЫМИ СОБСТВЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ПО ДАННЫМ GAIA В КАТАЛОГЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ SRG/eROZITA

© 2022 г. И. М. Хамитов<sup>1,2,3\*</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>1,3</sup>, М. Р. Гильфанов<sup>4,5</sup>, Р. А. Сюняев<sup>4,5</sup>, П. С. Медведев<sup>4</sup>, М. А. Горбачев<sup>1,3</sup>, Э. Н. Иртуганов<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>Государственная обсерватория ТЮБИТАК, Анталья, Турция

<sup>3</sup>Академия наук Татарстана, Казань, Россия

<sup>4</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

На основе сравнения каталога рентгеновски-активных звезд SRG/eROZITA и каталога спутника Gaia получена выборка из 502 пекулярных объектов, для которых Гайя, с одной стороны, детектирует параллакс или собственное движение и, с другой стороны, регистрирует признаки оптической протяженности. На диаграмме  $F_X/F_{\text{opt}}$  — цвет G–RP эти объекты в значительной степени отделены от основной массы звезд и находятся в области, характерной для галактик с активными ядрами. Согласно базе данных Simbad, около  $\approx 50\%$  из них являются АЯГ и галактиками со спектроскопическими красными смещениями, и лишь  $\sim 1.4\%$  являются подтвержденными объектами в нашей Галактике. Спектроскопические наблюдения 19 неотожествленных объектов на телескопе РТТ-150 показали, что 18 из них являются АЯГ, расположенными на красных смещениях  $\sim 0.01$ – $0.3$ , а один объект — М-звездой в нашей Галактике. Мы обсуждаем различные сценарии появления таких пекулярных объектов.

*Ключевые слова:* рентгеновские источники, активные ядра галактик, оптические наблюдения, собственные движения.

DOI: 10.31857/S0320010822110092

### ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновский телескоп eROZITA (Предел и др., 2021) орбитальной обсерватории SRG (Сюняев и др., 2021) по итогам более чем двух лет сканирования неба задетектировал беспрецедентное количество рентгеновских источников с высокой позиционной точностью. Одним из направлений работы с полученным каталогом рентгеновских источников являются поиск и исследование звезд в нашей Галактике, активных в рентгеновском диапазоне. Для этой цели используется каталог спутника Gaia, который содержит информацию о параллаксах и собственных движениях около полутора миллиардов оптических источников на всем небе. Пересечение двух каталогов позволяет сформировать каталог рентгеновски-активных звезд для дальнейшего исследования. В процессе исследования полученного

каталога было обнаружено небольшое количество объектов с противоречивыми характеристиками по рентгеновским и оптическим данным, одновременно указывавшими как на внегалактическую, так и на галактическую природу источников.

Похожие результаты были ранее получены Суше и др. (2022) — по итогам сопоставления большого астрометрического каталога квазаров (LQAC-5) и источников Gaia (eDR3) было обнаружено некоторое количество внегалактических источников, для которых Гайя регистрирует статистически значимые параллаксы и/или собственные движения. Примером может служить самый яркий (в оптике) радио квазар 3C273, обладающий значимым собственным движением (Сообщество Гайя, 2022b). С одной стороны, регистрация собственного движения для спектроскопически подтвержденных квазаров может указывать на погрешности одного из сопоставленных каталогов.

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

С другой же стороны, возможным объяснением таких противоречащих друг другу фактов может быть смещение фотоцентра галактики или ее активного ядра на масштабе наблюдений Gaia, т.е. нескольких лет со значимыми позиционными измерениями. Это может происходить, например, из-за движения джетов в активном ядре либо явлений микролинзирования. Так, на основе новых высокоточных наблюдений, выполненных для 4 внегалактических радио источников (3C 48, STA 21, 1144+352, 1328+254) на VLBI в 2018–2021 гг., было обнаружено существенное смещение их положений от 20 до 130 милли угл. сек на временном интервале более 2 десятилетий (Титов и др., 2022). Выделение подобных внегалактических источников из выборки квазаров и АЯГ крайне важно для задачи построения фундаментальной системы координат Gaia.

Исследованию таких пекулярных объектов и посвящена настоящая статья. В разделе “Отбор источников” описана методика отбора оптических кандидатов внегалактических источников с собственными движениями из каталога рентгеновских звезд eРОЗИТА. В разделе “Оптическое отождествление выборки протяженных источников” проводится отождествление полученной выборки с базой данных Simbad. В разделе “Оптическая спектроскопия кандидатов” представлены результаты спектральных наблюдений для 19 неотожествленных источников, проведенные на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 в период с сентября по октябрь 2022 г. В разделе “Анализ и обсуждение” рассмотрены возможные сценарии, которые могли бы объяснить видимое собственное движение внегалактических источников.

## ОТБОР ИСТОЧНИКОВ

### *Данные телескопа eРОЗИТА*

В работе использован рентгеновский каталог источников SRG/eРОЗИТА в восточном галактическом полушарии, за обработку данных на котором отвечает российский консорциум телескопа eРОЗИТА. Он был получен научной группой по созданию каталога источников российского консорциума телескопа eРОЗИТА. Подробное описание процедуры детектирования и характеристики источников, астрометрической коррекции и валидации каталога будут даны в отдельной работе. Здесь же приведем лишь основные факты. При построении каталога были использованы данные, полученные телескопом SRG/eРОЗИТА в период с декабря 2019 г. по февраль 2022 г. по итогам четырех полных обзоров неба и частичного пятого обзора, покрывшего  $\approx 38\%$  неба. Калибровка данных телескопа eРОЗИТА, создание карт

неба, детектирование и характеристика источников проводились с помощью отдельных компонент программного обеспечения eSASS, разработанного немецким консорциумом SRG/eРОЗИТА (Бруннер и др., 2022) и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом SRG/eРОЗИТА в ИКИ РАН. При обработке данных использовались результаты наземных калибровок и калибровочных наблюдений, выполненных в октябре–ноябре 2019 г. Для дальнейшего анализа будет использован каталог источников в диапазоне 0.3–2.3 кэВ, отфильтрованный с порогом по достоверности детектирования, соответствующим  $4\sigma$  (порог по величине правдоподобия  $\geq 10$ ).

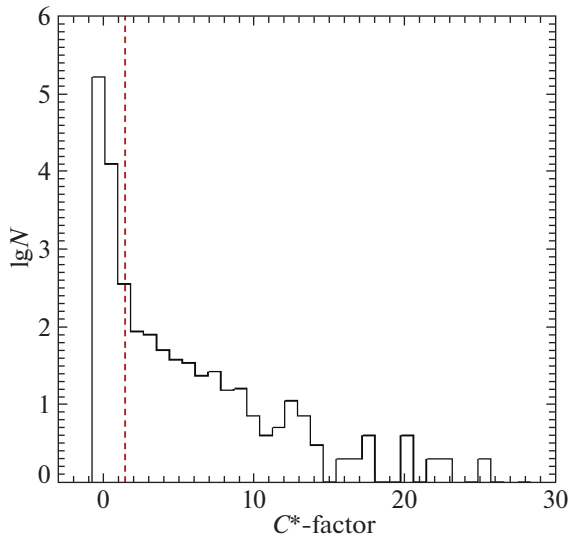
### *Составление каталога рентгеновских звезд*

Отбор кандидатов в Галактические источники проводился на основе сравнения с каталогом спутника Gaia. Для этого рентгеновский каталог был скоррелирован с каталогом Gaia eDR3 и были отобраны источники eРОЗИТА так, что (i) в круге 98% ошибок<sup>1</sup> был найден только один источник из каталога Gaia, и (ii) для этого источника спутником Gaia был измерен параллакс или собственное движение с отношением сигнал–шум  $S/N \geq 5$ . При определении достоверности измерения собственного движения проверялись как компоненты собственного движения по экваториальным координатам, так и суммарное собственное движение источника. При корреляции каталогов eРОЗИТА и Gaia положения оптических источников были поправлены на их собственное движение в тех случаях, когда отношение сигнал–шум по собственному движению превышало  $S/N \geq 3$ .

В результате такого анализа был получен каталог вероятных кандидатов в Галактические объекты, который включил в себя около  $\sim 1.7 \times 10^5$  источников. Подавляющее большинство этих объектов — звезды, активные в рентгеновском диапазоне. Также вносят вклад активные двойные звезды, катаклизмические переменные, рентгеновские двойные и другие менее многочисленные классы объектов.

Мы не рассматриваем вопросы полноты и чистоты полученного каталога, так как они не являются определяющими для целей данного исследования. Эти вопросы будут обсуждаться в последующих публикациях. Целью же работы являются поиск и исследование немногочисленной группы пекулярных объектов в каталоге eРОЗИТА. При этом мы не ставим задачу составить исчерпывающий список таких объектов, а процедура их поиска

<sup>1</sup> Типичные значения радиуса 98% круга позиционных ошибок для источников eРОЗИТА составляют  $\approx 5$ –20 угл. сек.



**Рис. 1.** Распределение значений  $C^*$ -фактора для источников каталога рентгеновских звезд. Вертикальной штриховой линией показано значение 1.5, использованное для отбора кандидатов в оптически протяженные объекты.

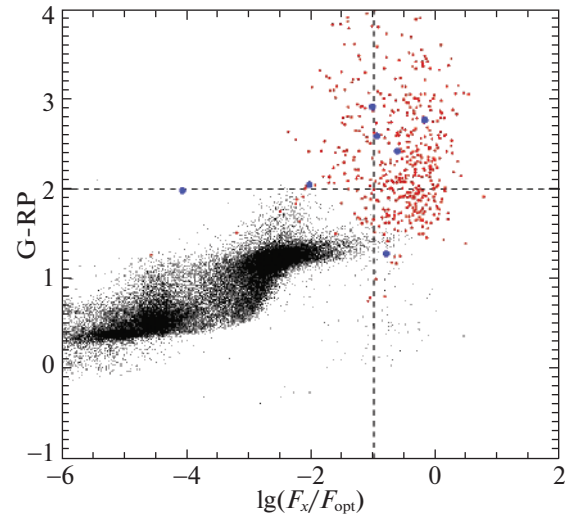
исключает случайные совпадения, по крайней мере, с точки зрения оптических характеристик.

Тем не менее сделаем несколько общих замечаний. Во-первых, отметим, что вышеописанный анализ проводился с использованием 98% радиуса локализации рентгеновских источников (ошибки локализации оптических источников многократно меньше и не важны в данном рассмотрении). По определению 98% ошибки, 2% объектов должны находиться вне этого радиуса. Это вносит соответствующий, но не определяющий вклад в полноту и чистоту получаемой выборки. Более важный источник загрязнения каталога — случайные совпадения. Что касается полноты по отношению к Галактическим объектам, она главным образом определяется тем, что мы ограничились случаями попадания в круг ошибок локализации источников eРОЗИТЫ только одного объекта Gaia и из рассмотрения были исключены рентгеновские источники, имеющие более одного объекта Gaia в круге ошибок.

Для краткости в дальнейшем будем называть полученную выборку объектов “каталогом рентгеновских звезд”, понимая при этом, что он включает и другие типы Галактических источников и имеет ограниченную полноту и чистоту.

#### *Поиск протяженных оптических источников в каталоге рентгеновских звезд*

В каталоге Gaia eDR3, помимо интегрального потока в широкой фотометрической полосе G, приводятся также потоки в полосах BP и RP, которые



**Рис. 2.** Рентгеновские звезды в пределах 200 пк (черные символы) и кандидаты в оптически протяженные объекты, отобранные по значению  $C^*$ -фактора (красные символы) на плоскости цвет G–RP, и отношение  $\log(F_X/F_{\text{opt}})$ . Синими символами отдельно отмечены те из кандидатов в оптически протяженные объекты, которые были идентифицированы с источниками Млечного Пути. Рентгеновский поток  $F_X$  измерен по данным eРОЗИТА в диапазоне 0.3–2.3 кэВ, а оптический поток — по измерениям спутника Gaia в полосе G. Штриховыми линиями показаны условные границы, отделяющие звезды от галактик, АЯГ и квазаров по цвету и по отношению  $F_X/F_{\text{opt}}$ , см. текст.

являются (почти) двумя “половинками” полосы G. На их основе строится параметр избытка цвета  $BP + RP$  ( $\text{phot\_BP\_RP\_excess\_factor}$  в обозначениях каталога Gaia), вычисляемый как отношение суммы потоков в полосах BP и RP к потоку в полосе G. В литературе эта величина иногда обозначается  $S$  и используется для характеристики качества фотометрии спутника Gaia и, в частности, как признак протяженности объекта (Риелло и др., 2021). Несмотря на то что пропускание в G практически полностью покрывает сумму полос BP и RP, из-за того что в полосе G при передаче на

**Таблица 1.** Результаты отождествления источников выборки протяженных объектов по Simbad

Тип источника	$N$
Активные ядра галактик	182
Галактики с измеренными $z$	69
Галактики с неизмеренными $z$	39
Галактические источники	6
Неизвестные протяженные	122
Неизвестные блендерные	84

**Таблица 2.** Отождествленные внегалактические источники со спектрально измеренными красными смещениями с видимыми собственными движениями. В таблице представлены 10 источников с наибольшими собственными движениями по мере убывания данной величины

eROSITA (SRGe+)	GAIA eDR3	RA	DEC	sep (arcsec)	Gmag	BP-RP	$\mu$ (mas/yr)	z	Type
J184426.6+624831	2157144511215355264	18 44 26.31	+62 48 29.8	0.62	18.97	1.58	28.09 ± 0.89	1.880	QSO**
J173533.5+252042*	4593766796395321344	17 35 33.35	+25 20 45.4	1.42	19.38	1.31	17.33 ± 0.28	0.01476	galaxy
J131118.5+463502*	1553988166345499136	13 11 18.54	+46 35 02.3	0.27	19.45	1.27	14.94 ± 0.84	0.271342	QSO**
J204113.5–381140	6682056384781697536	20 41 13.45	–38 11 37.5	5.12	19.05	0.99	10.49 ± 0.41	0.020204	galaxy
J160851.4+295719	1318789194505704192	16 08 51.07	+29 57 15.0	0.18	19.91	1.62	9.98 ± 1.51	0.04849	Sy2
J110503.8+505951	839151745380126336	11 05 04.21	+50 59 49.9	0.18	19.86	1.36	9.43 ± 1.30	0.11829	Sy1**
J144026.2+332703	1286762448016026112	14 40 25.84	+33 27 02.6	0.24	20.82	1.46	9.41 ± 2.24	0.27474	Sy1
J014417.5+314004	303683913296921728	01 44 17.27	+31 40 03.3	0.13	20.09	1.81	9.32 ± 1.93	0.123625	QSO
J145425.5+464525*	1590336508929283200	14 54 25.48	+46 45 24.1	0.23	18.99	1.29	8.99 ± 0.81	0.06914	Sy1
J135620.6+264356	1450823498570440832	13 56 20.70	+26 43 54.4	0.19	19.66	1.48	8.86 ± 1.54	0.06178	Sy1

\* Источники, у которых отношение полного смещения к параметру невязки астрометрической модели ( $\mu * 2.8$ )/ $\epsilon_i$  больше 5 (см. раздел “Анализ и обсуждение”).

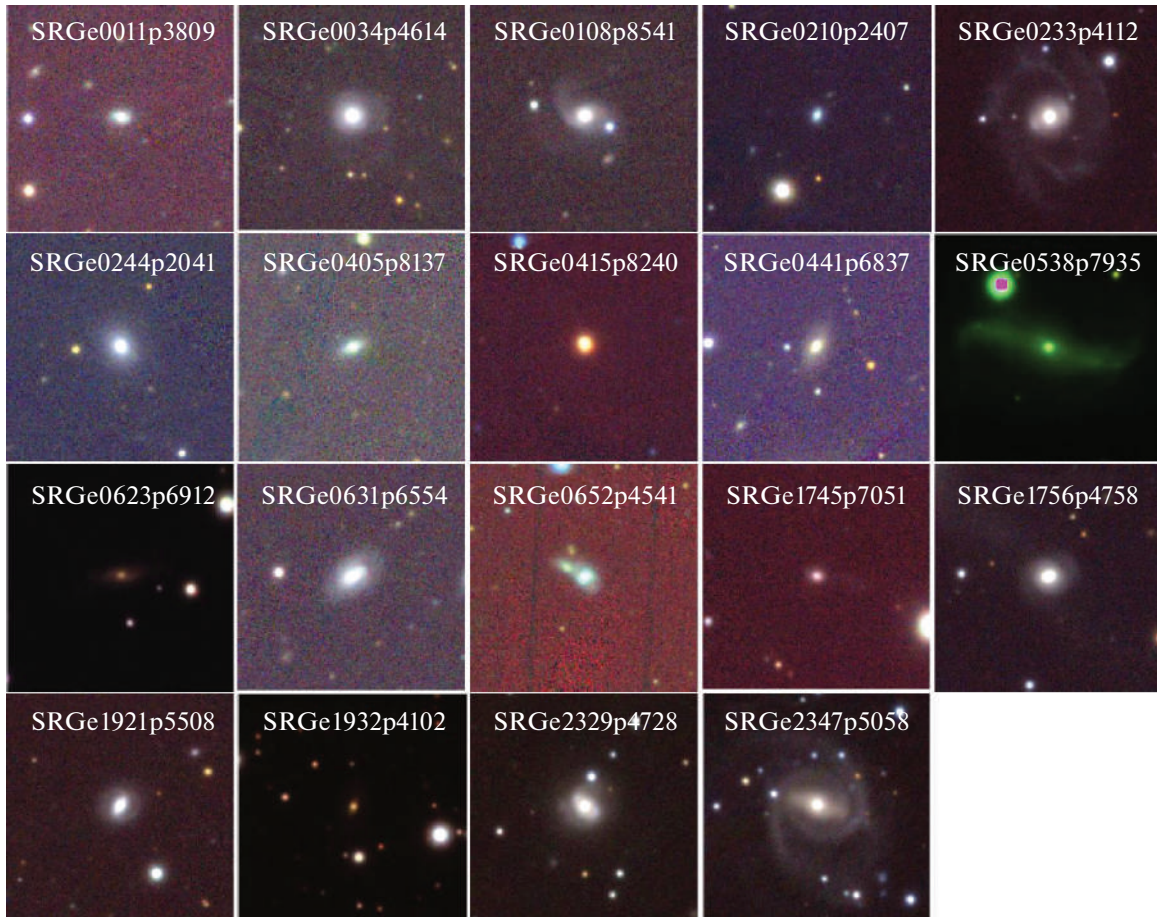
\*\* Источники большого астрометрического каталога квазаров LQAC-5.

Землю используются более узкие окна на ПЗС-матрицах Gaia, для протяженных или блендированных источников этот параметр будет больше единицы. Для точечных источников он близок или чуть больше единицы, с некоторой зависимостью от формы спектра объекта. В частности, из-за меньшей чувствительности фильтра G в красной области спектра по сравнению с фильтром RP, источники с эмиссионными деталями могут показывать значительные данные избытка цвета. Поэтому был предложен скорректированный фактор избытка цвета  $C^*$ , учитывающий этот эффект (Риелло и др., 2021), который мы и будем использовать в дальнейшем. Параметр  $C^*$  определен так, что для точечных источников он близок к нулю (в отличие от  $C$ ). На рис. 1 показано распределение значений  $C^*$ -фактора для источников каталога рентгеновских звезд.

На основе каталога рентгеновских звезд мы составили две выборки объектов. Первая — это все источники в пределах 200 пк от Солнца, т.е. имеющие параллакс >5 милли угл. сек. Далее мы будем называть ее “выборкой близких звезд”. Она с достаточной степенью полноты характеризует свойства рентгеновских звезд. Вторая выборка составлена из источников, у которых скорректированный  $C^*$ -фактор превышает 1.5, т.е. это выборка вероятных оптически протяженных или блендированных объектов (далее “выборка протяженных объектов”). В нее вошли 502 объекта из каталога рентгеновских звезд. На рис. 2 эти две выборки изображены на плоскости логарифма отношения рентгеновского потока к оптическому  $F_X/F_{opt}$  и

цвета G–RP. Отношение  $F_X/F_{opt}$  вычислялось по рентгеновскому потоку в диапазоне 0.3–2.3 кэВ и оптическому потоку в полосе G. Черными точками показана выборка близких звезд, а красными, соответственно, источники выборки протяженных объектов. Горизонтальной пунктирной линией показана граница по цвету G–RP, равная 2, выше которой в основном находятся галактики (Сообщество Гаия, 2022a). Вертикальная пунктирная линия  $\log(F_X/F_{opt}) = -1$  — условная граница между АЯГ и звездами (Бельведерский и др., 2023). Видно, что на этой диаграмме оптически протяженные источники в основном расположены в области, характерной для активных галактик и квазаров.

Таким образом, из каталога рентгеновских звезд eROZITA были отобраны 502 рентгеновских источника, которые отождествляются с пекулярными объектами Gaia. Пекулярность объектов Gaia состоит в том, что у них, с одной стороны, регистрируются статистически значимые параллакс или собственное движение, что идентифицирует их как объекты в нашей Галактике, а с другой, согласно параметру избытка цвета Gaia, они вероятно являются оптически протяженными объектами. В то же время у них регистрируются аномально большой индекс цвета G–RP и/или высокое отношение  $F_X/F_{opt}$ , не характерные для звезд (рис. 2). Последующие разделы статьи посвящены исследованию этих необычных объектов.



**Рис. 3.** Визуальная инспекция морфологии источников. Представлены поля 19 источников, для которых получены спектры на PTT-150. Размер каждого поля  $60 \times 60$  угл. сек. Только один источник SRGeJ0415p8240 (полный идентификатор SRGeJ041510.2+824005) оказался звездой M-класса с сильной эмиссионной линией H $\alpha$ . Остальные кандидаты были подтверждены в качестве внегалактических источников рентгеновского излучения с красными смещениями от 0.016 до 0.272, активные ядра галактик различных типов.

### ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ВЫБОРКИ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Отождествление выборки протяженных источников производилось с помощью базы данных Simbad<sup>2</sup>. Поиск совпадений проводился с радиусом поиска 0.5 угл. сек. Мы также нашли 11 совпадений с точностью до нескольких угловых секунд, которые мы решили оставить в списке совпадений для дальнейшего исследования.

Результаты отождествления приведены в табл. 1. Всего было найдено 251 совпадение источников выборки протяженных объектов с внегалактическими объектами Simbad со спектрально измеренными красными смещениями. Для 41 из них модуль собственного движения превышает 5 милли угл. сек/год, а для четырех — более 10 милли

угл. сек/год. Десять отождествленных внегалактических объектов с наибольшими собственными движениями приведены в табл. 2.

Отметим, что по результатам отождествления с Simbad мы нашли среди выборки протяженных источников 6 объектов Галактической природы. Из них 4 источника являются маломассивными рентгеновскими двойными, у которых  $C^*$ -фактор лежит в пределах от 4.5 до 8.5, одна звезда M-класса и одна катаклизмическая переменная с  $C^*$  меньше 2 (1.95 и 1.61 соответственно). Причем логарифм  $F_X/F_{\text{opt}}$  у КП превышает  $-1$ , а у M-звезды около  $-4$ . Рентгеновские двойные расположены в районе галактики M31 и сложный фон, по всей видимости, является причиной больших значений  $C^*$ .

Для источников выборки протяженных объектов без отождествления Simbad проводилась визуальная инспекция их морфологии по оптическим изображениям Pan-STARRS DR1 (Чамберс

<sup>2</sup><https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fcoo>

Таблица 3. Результаты спектральных наблюдений на РТТ-150

eROSITA (SRGe+)	GAIA eDR3	RA	DEC	Gmag	BP-RP	$\mu_\alpha$ (mas/yr)	$\mu_\delta$ (mas/yr)	z	Type
J001124.6+380935	2877771750682930176	00 11 24.46	+38 09 33.7	19.92	1.14	4.35 ± 1.13	-3.72 ± 0.96	0.137	AGN
J003447.2+461429	389161012394980352	00 34 47.72	+46 14 29.3	18.87	1.38	2.37 ± 0.39	-1.87 ± 0.32	0.1344	AGN
J010812.2+854152	573881985223210368	01 08 11.86	+85 41 50.7	19.39	1.38	0.33 ± 0.60	-3.34 ± 0.55	0.0772	Sy2
J021049.7+240709	104209409979045376	02 10 49.38	+24 07 06.7	19.34	1.35	-0.79 ± 0.52	2.593 ± 0.47	0.1437	Sy1
J023309.6+411225*	338399652915819648	02 33 09.64	+41 12 22.5	19.16	1.34	4.68 ± 0.85	-7.46 ± 0.94	0.062	Sy1
J024443.5+204136	85364953204844416	02 44 43.31	+20 41 38.6	18.68	1.33	-1.54 ± 0.35	0.92 ± 0.31	0.0508	Sy2 **
J040550.9+813716	569719612155006208	04 05 51.36	+81 37 17.2	19.25	1.54	-0.87 ± 0.31	-1.77 ± 0.31	0.118	Sy1
J041510.2+824005	569939106459907328	04 15 10.62	+82 40 11.8	16.76	3.17	20.88 ± 0.15	-36.98 ± 0.11		M-star
J044110.7+683728	495873426235161344	04 41 11.00	+68 37 29.3	19.78	1.72	3.32 ± 0.38	1.99 ± 0.65	0.1205	AGN
J053821.8+793515	553597546173225216	05 38 23.46	+79 35 12.7	17.53	1.38	-2.21 ± 0.40	3.66 ± 0.46	0.0155	AGN
J062329.3+691238	1106940173151909888	06 23 29.08	+69 12 32.6	19.93	1.68	-2.46 ± 0.57	-3.82 ± 0.73	0.0548	AGN
J063147.1+655440	1104230151864373888	06 31 47.43	+65 54 42.5	19.36	1.29	-0.33 ± 0.35	-1.94 ± 0.39	0.1075	AGN
J065210.0+454141	954093346623632512	06 52 10.08	+45 41 44.5	19.30	1.30	0.36 ± 0.82	-3.75 ± 0.72	0.1091	Sy2
J174514.8+705128	1639075140673511424	17 45 14.77	+70 51 26.8	19.42	1.29	0.70 ± 0.32	-2.17 ± 0.41	0.272	Sy1
J175610.9+475824	1363075598726822912	17 56 10.81	+47 58 24.8	18.67	1.38	-2.43 ± 0.37	-0.53 ± 0.35	0.0619	Sy2
J192156.1+550847	2140251786365419008	19 21 56.06	+55 08 47.1	18.36	1.21	-3.01 ± 0.23	-1.37 ± 0.25	0.092	Sy2
J193203.8+410244	2053551343150878336	19 32 04.02	+41 02 43.4	18.52	1.34	-0.93 ± 0.18	-0.12 ± 0.19	0.0835	Sy1
J232910.3+472800	1941757330160593536	23 29 10.44	+47 28 01.3	18.55	1.47	-1.65 ± 0.38	2.86 ± 0.41	0.04	Sy1
J234726.2+505850	1944173403888702592	23 47 26.32	+50 58 50.4	19.53	1.75	-2.77 ± 0.62	4.24 ± 0.59	0.0621	Sy1

\* Источник, у которого отношение полного смещения к параметру невязки астрометрической модели ( $\mu * 2.8$ )/ $\epsilon_i$  больше 5 (см. раздел “Анализ и обсуждение”).

\*\* Спектральное измерение красного смещения источника имеется также в каталоге LAMOST DR7 (Ванг и др., 2022),  $z = 0.050928 \pm 0.00004$ .

и др., 2016); для этой цели использовался веб-интерфейс глубоких изображений PanSTARRS-1 Image Access<sup>3</sup>. Результаты этой работы приведены в двух нижних строчках табл. 1. На рис. 3 показаны примеры отождествления протяженных источников. Таким образом, был составлен список источников, имеющих протяженную структуру, для дальнейшего исследования их природы по спектральным наблюдениям.

### ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КАНДИДАТОВ

Для оптической спектроскопии были отображены 19 ярких объектов из категорий “галактики с неизвестным z” и “неизвестные протяженные источники” с G ярче 20<sup>m</sup> с прямыми восхождениями от 17<sup>h</sup> до 7<sup>h</sup> и склонениями выше  $\geq 20$  градусов. Приоритет отдавался объектам на склонениях

$\geq 37$  градусов, поскольку данная программа имела статус пилотной и наблюдения проводились в светлое время вне основных наблюдательных программ оптической поддержки обсерватории СРГ.

Спектральные наблюдения этих объектов проводились на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 на приборе ТФОСК<sup>4</sup> из группы источников идентифицированных как галактики с неизвестными красными смещениями, а также из числа неизвестных протяженных источников. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС-камера Andor iKon-L 936 VEX2-DD-9ZQ<sup>5</sup> размером 2048 × 2048 пикселей с элементом разрешения 0".326, с охлаждением -80°C. Квантовая эффективность ПЗС-приемника порядка 90% и выше в диапазоне длин волн от 4000 до 8500 Å.

<sup>4</sup><https://tug.tubitak.gov.tr/en/teleskoplar/rtt150-telescope-0>

<sup>5</sup><https://andor.oxinst.com/products/ikon-xl-and-ikon-large-ccd-series/ikon-l-936>

<sup>3</sup><https://ps1images.stsci.edu/cgi-bin/ps1cutouts>



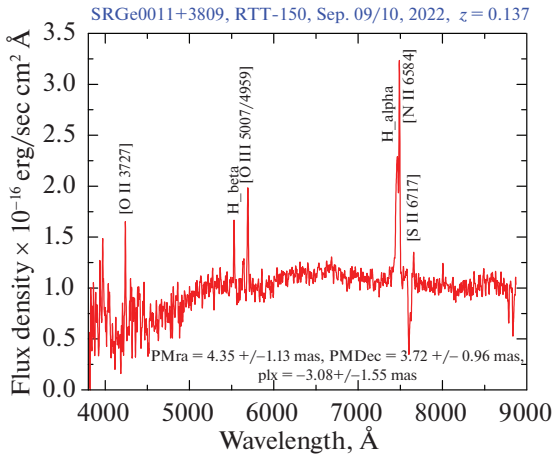


Рис. 4. Спектр SRGeJ001124.6+380935. Красное смещение 0.137, активное ядро галактики типа Sy2.

В период с сентября по октябрь 2022 г. были получены спектры низкого разрешения в интервале длин волн от 3800 до 8800 Å для 19 кандидатов со спектральным разрешением 15 Å. Использовалась гризма 15 с входной щелью 0.134 мм (2.4 угл. сек). Обработка спектральных данных проводилась стандартным образом с помощью ПО IRAF<sup>6</sup>, а также с помощью собственного ПО с применением стандартного набора калибровок. Спектрофотометрическая калибровка инструментальных спектров была получена с помощью наблюдений спектрофотометрических стандартов на том же зенитном расстоянии, что и исследуемые объекты (Оке, 1990).

Результаты спектральных наблюдений на РТТ-150 приведены в табл. 3. Для примера на рис. 4 показан полученный на РТТ-150 спектр отождествления кандидата SRGeJ001124.6+380935, который определен как галактика с активным ядром типа Sy2. Только один источник — SRGeJ041510.2+824005 — оказался звездой М-класса с сильной эмиссионной линией H $\alpha$ . Остальные кандидаты были подтверждены в качестве внегалактических источников. Все они оказались АЯГ различных типов с красными смещениями от 0.0155 до 0.272. Неопределенность измерений красных смещений составляет  $\delta z/(1+z) \sim 0.001$ . Измерение красного смещения источника SRGeJ024443.5+204136, с довольно общим определением его типа как внегалактического объекта, имеется также в каталоге LAMOST DR7 (Ванг и др., 2022),  $z = 0.050928 \pm 0.00004$ , которое совпадает в пределах точности измерений по данным РТТ-150.

Программа спектральных наблюдений объектов выборки протяженных объектов, доступных

для наблюдений на РТТ-150 ( $\text{DEC} \geq -30$  градусов,  $G \leq 20^m$ ), будет продолжена. Объекты слабее  $G > 20^m$  планируются для наблюдений телескопами большей апертуры.

## АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Возможные астрофизические причины видимых собственных движений внегалактических объектов*

Наличие видимого собственного движения у внегалактических источников может быть следствием изменения фотоцентра объекта, что может происходить по ряду причин астрофизической природы. Положение фотоцентра галактики с активным ядром, измеряемое Gaia, определяется суммой вкладов звездной компоненты, аккреционного диска, ядра, джета и излучения среды, взаимодействующей с джетом. Также может играть роль явление микролинзирования. Переменность относительно вклада разных компонент может приводить к зависимости от времени оптических координат АЯГ. Собственное движение отражает среднее значение изменения положения фотоцентра за период времени более 2.8 лет, использованных в Gaia eDR3 данных при построении астрометрических решений (Сообщество Гаия, 2021a). Следовательно, полное смещение фотоцентров ( $l$ ) исследуемых объектов есть величина собственного движения, умноженная на фактор  $\sim 3$ . Таким образом, для обеспечения наблюдаемого видимого собственного движения АЯГ две компоненты излучения должны находиться на расстоянии от нескольких единиц до нескольких десятков милли угл. сек, и их блеск должен изменяться на масштабах  $\sim 3$  лет. Такие угловые расстояния соответствуют линейным размерам от нескольких парсек до нескольких сотен парсек в зависимости от расстояния до объекта. Такие расстояния между компонентами могут быть обеспечены в результате движения джета и его взаимодействия с окружающей средой. Действительно, в работе (Петров и др., 2019) по ранее обнаруженному смещению в положениях между радиоисточниками VLBI (в основном АЯГ) и их оптическими компонентами в Gaia (Петров, Ковалев, 2017) было получено, что линии значительных смещений параллельны направлению джетов в 62% случаев. А также отмечено, что параллельность вектора собственных движений к направлению джетов имеет место гораздо чаще в случае с большими значениями модуля собственного движения.

Для объекта, расположенного на красном смещении  $\sim 0.05-0.25$ , одна миллисекунда дуги соответствует линейному размеру от  $\sim 1-4$  пк и, следовательно, скорости видимых смещений компонент должны быть сверхсветовыми,  $\sim 1-10c$  для того, чтобы объяснить наблюдаемые собственные

<sup>6</sup><http://iraf.noao.edu/>

движения. В случае релятивистского джета при скоростях, близких к скорости света, значительные видимые смещения джета наблюдаются на масштабе нескольких лет. Например, в (Биретта и др., 1999) с помощью космического телескопа Хаббла измерено смещение сверхсветовых деталей в релятивистском джете в M87 порядка 100 мили угл. сек за 5 лет. В релятивистских случаях смещение фотоцентра будет определяться уже характером движения самого джета.

На положение фотоцентра могут оказать влияние и случаи, когда звезда нашей Галактики проецируется на ядро АЯГ. В этом случае должно наблюдаться и параллактическое смещение фотоцентра, а если звезда находится на периферии Млечного Пути, вклад звезды будет только в видимое собственное движение. Для таких случаев в спектрах АЯГ будет присутствовать и спектр самой звезды, который можно выделить при спектральных наблюдениях с высоким отношением сигнала к шуму. Кроме того, для выделения подобных случаев можно воспользоваться одним из параметров каталога Gaia eDR3 — частотой выявления множественных пиков при определении параметров изображения (`ipd_frac_multi_peak`). Данный модуль выражается в процентах выявления двойного пика в одномерном наблюдательном окне к общему числу измерений (Сообщество Гайа, 2021a). Показания этого параметра в нашей выборке не превышают 10%, кроме источника SRGeJ184426.6+624831 с самым высоким значением собственного движения, у которого в более половине случаев наблюдается двойная структура изображения (53%). Таким образом, аномальное значение собственного движения у квазара SRGeJ184426.6+624831 может быть объяснено наличием звезды Млечного Пути в субсекундной области изображения источника. Однако отсутствие значимого параллакса не исключает и случай двойного ядра в квазаре.

#### *Характеристики шума в астрометрических решениях Gaia*

Для оценки качества астрометрических решений Gaia и их согласия с данными мы использовали один из параметров каталога Gaia eDR3 — так называемый избыток шума источника  $\epsilon_i$  (`astrometric_excess_noise`). Эта величина характеризует невязку между измеренными положениями источника и 5-параметрической астрометрической моделью. Положительные значения означают, что невязки выше статистически ожидаемых значений. Значимость же самой величины  $\epsilon_i$  определяется параметром значимости  $D$  (`astrometric_excess_noise_sig`). При  $D > 2$  значения  $\epsilon_i$  статистически значимы. Избыток

шума характеризует различные виды модельных и инструментальных ошибок, которые превышают ошибки определения центроида. Можно ожидать, что источники со сложной и переменной структурой фотоцентра могут иметь значительные отклонения от стандартной 5-параметрической астрометрической модели и соответственно положительные значения  $\epsilon_i$ . На рис. 5 показан график зависимости отношения полного смещения фотоцентров отождествленных источников выборки к параметру избытка шума источника ( $l/\epsilon_i$ ) от самой величины  $\epsilon_i$  для близких звезд и протяженных источников. Штриховая линия на графике соответствует  $l/\epsilon_i$ , равному 5.

На рис. 5 видно, что звезды имеют высокое значение отношения сигнал—шум: для них измеряемое собственное движение  $\mu$  на  $\sim 1-2$  порядка превышает величину избытка астрометрического шума  $\epsilon_i$ . В то же время для протяженных объектов наблюдается обратная картина — полное смещение на небе  $\mu$  для большинства объектов лишь в  $\sim 2-3$  раза превышает астрометрический шум  $\epsilon_i$ . Это может указывать на некоторую нерегулярность в движении фотометрического центра протяженных объектов по сравнению с предсказанием астрометрической модели. Небольшое число объектов из каталога протяженных источников, имеющих высокие значения отношения сигнал—шум, вероятно являются реальными галактическими источниками с собственными движениями. Отметим, что звезда M-класса, отождествленная по наблюдениям PTT-150, имеет отношение  $(\mu * 2.8)/\epsilon_i \sim 200$ .

В табл. 4 приведены 25 источников, лежащих выше этой штриховой линии. Примечательно, что только 3 источника из табл. 2 с наибольшими собственными движениями имеют значение  $l/\epsilon_i$  выше пяти. Среди источников, обозначенных в табл. 4 как galaxy, согласно классификации из Simbad, только у SRGeJ192852.3-251642 оптический спектр из обзора 6dFGS (Джонс и др., 2009), полученный в 2003 г., является спектром эллиптической галактики с линиями поглощения [K, H] Ca, G, Mg, Na на красном смещении  $z = 0.10773$  и с полным отсутствием характерных для АЯГ эмиссионных линий. Для 11 источников имеются значимые радиокомпоненты, либо в публичной части обзора LoTSS в диапазоне 120–168 МГц (Шимвел и др., 2019), либо в обзоре северного неба VLASS в диапазоне 2–4 ГГц (Гордон и др., 2021), что составляет 44% от общего числа. В основном это Сейфертовские галактики 1 типа и квазары. Из 4 источников, которые попадают в весеннее поле HETDEX обзора LoTSS размером 424 кв. градусов, только у SRGeJ113925.5+451345 не обнаруживается значимый сигнал в радиодиапазоне. Надежные измерения плотности потока радиокомпонент ( $S_{\text{peak}} >$



**Таблица 4.** Известные и исследованные на РТТ-150 АЯГ с  $l/\epsilon_i$  больше 5. Источники упорядочены по мере убывания собственного движения

eROSITA (SRGe+)	GAIA eDR3	RA	DEC	Gmag	$\mu$ (mas/yr)	$l/\epsilon_i$	LOFAR (mJy)	VLASS (mJy)	z	Type
J131118.5+463502	1553988166345499136	13 11 18.54	+46 35 02.3	19.45	14.94 ± 0.84	5.2	6.6		0.271342	QSO <sup>1</sup>
J145425.5+464525	1590336508929283200	14 54 25.48	+46 45 24.1	18.99	8.99 ± 0.81	5.4	3.7	1.71	0.06914	Sy1 <sup>2</sup>
J023309.6+411225	338399652915819648	02 33 09.64	+41 12 22.5	19.16	8.81 ± 1.24	5.4		0.63	0.062	Sy1 <sup>3</sup>
J110241.8+420655	778252648175937920	11 02 41.47	+42 06 51.9	19.35	7.02 ± 0.90	5.1			0.07498	Sy1 <sup>2</sup>
J212404.9–164149	6835161283006507520	21 24 04.81	–16 41 48.1	19.17	7.01 ± 1.09	5.0			0.03588	galaxy <sup>4</sup>
J004447.5+152910	2781106124341566976	00 44 47.34	+15 29 11.9	20.22	6.51 ± 1.17	5.7			0.2272	Sy1 <sup>2</sup>
J233515.6–085729	2438794099819112960	23 35 16.07	–08 57 23.5	20.04	5.23 ± 1.04	5.3			0.08566	galaxy <sup>2</sup>
J192852.3–251642	6766602609845906176	19 28 52.31	–25 16 38.7	19.17	5.20 ± 0.55	10.8			0.107730	galaxy <sup>4</sup>
J144227.5+555848	1607566096654997760	14 42 27.61	+55 58 46.4	18.61	4.61 ± 0.33	6.2	5.5	0.64	0.07689	galaxy <sup>2</sup>
J123740.2+611148	1580153004031345920	12 37 40.72	+61 11 48.6	19.79	4.10 ± 0.67	5.4			0.18143	Sy1 <sup>2</sup>
J002936.8–173833	2367248023501811840	00 29 36.79	–17 38 30.4	17.67	3.85 ± 0.30	6.0			0.05399	galaxy <sup>4</sup>
J021257.5+140609	77274609208701824	02 12 57.60	+14 06 10.2	18.24	3.66 ± 0.41	6.3		0.72	0.06172	Sy1 <sup>2</sup>
J143731.8+155549	1234415558406458752	14 37 31.70	+15 55 47.6	18.21	3.64 ± 0.45	5.2			0.03701	Sy1 <sup>7</sup>
J113925.5+451345	773886418783213312	11 39 25.56	+45 13 46.7	19.12	3.38 ± 0.51	5.4		0.67	0.1271	Sy1 <sup>2</sup>
J144924.5+321815	1283499819060669568	14 49 24.44	+32 18 16.2	18.37	3.29 ± 0.27	5.8		4.61	0.058	QSO <sup>6</sup>
J131447.1+260624	1447726002515875712	13 14 47.07	+26 06 24.1	18.22	3.21 ± 0.29	8.8			0.07178	Sy1 <sup>2</sup>
J195456.5–062851	4196937111313151744	19 54 56.43	–06 28 53.4	17.32	3.01 ± 0.28	5.1			0.029427	galaxy <sup>4</sup>
J010816.3–113401	2469702471186911616	01 08 16.31	–11 34 01.0	18.63	2.85 ± 0.58	5.1			0.04667	galaxy <sup>4</sup>
J070634.5+635057	1099887149653797120	07 06 34.82	+63 50 56.1	18.00	2.58 ± 0.27	5.6		0.85	0.01425	galaxy <sup>7*</sup>
J210221.6+105816	1756655887651319680	21 02 21.64	+10 58 16.0	17.78	2.39 ± 0.26	5.2		1.31	0.02893	Sy1 <sup>7</sup>
J235601.9+073123	2746340185147938304	23 56 01.95	+07 31 23.3	17.94	2.13 ± 0.35	6.0			0.040299	Sy1 <sup>8</sup>
J014458.6–023200	2505449660085848576	01 44 58.56	–02 31 59.0	17.73	1.98 ± 0.24	10.3			0.09573	galaxy <sup>4</sup>
J164313.8+095416	4446025560705238656	16 43 13.78	+09 54 16.2	17.33	1.63 ± 0.17	5.5		0.76	0.04727	galaxy <sup>7</sup>
J090436.8+553603	1035985561071454080	09 04 36.95	+55 36 02.7	17.57	1.57 ± 0.15	5.6			0.03724	Sy1 <sup>2</sup>
J224311.1+032804	2704625950939055488	22 43 11.02	+03 28 04.8	17.15	0.84 ± 0.14	6.2		2.41	0.03913	galaxy <sup>9</sup>

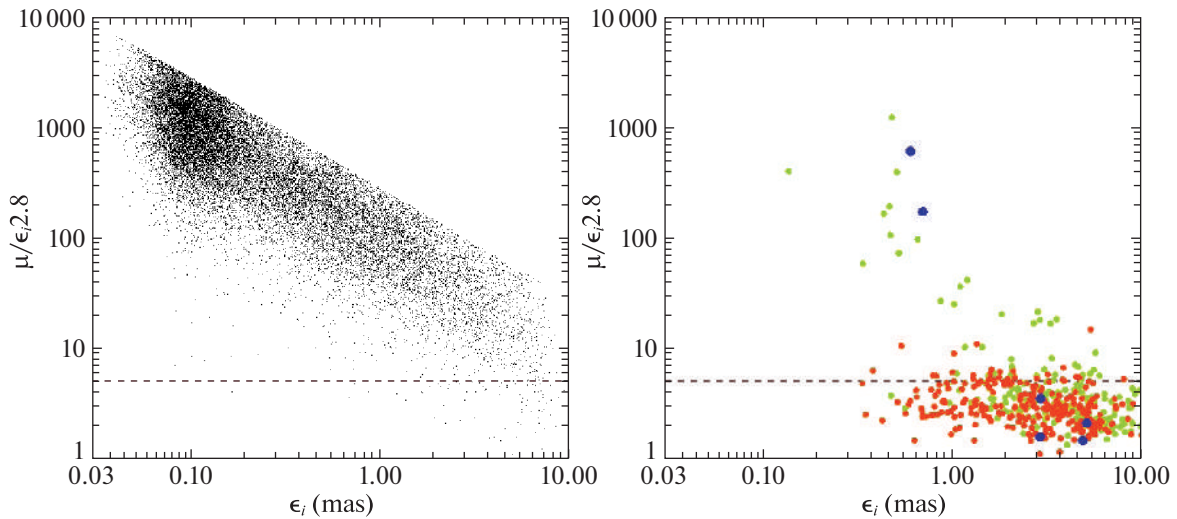
\* Для данного источника имеются два радиокомпонента с удалением от оптического на 0.5 и на 0.54 угл. сек дуги.

**Примечание.** Измерения LOFAR и VLASS превышают  $5\sigma$  и соответствуют пиковому потоку  $S_{\text{peak}}$  в частотных диапазонах 120–168 МГц и 2–4 ГГц. Измерения красных смещений и идентификация источников были использованы из следующих каталогов: 1 — SDSS DR7 (Абазьян и др., 2009), 2 — SDSS DR9 (Ан и др., 2012), 3 — РТТ-150 (данная работа), 4 — 6dFGS (Джонс и др., 2009), 5 — SDSS DR11/12 (Алам и др., 2015), 6 — LAMOST (Донг и др., 2018), 7 — UZC (Фалько и др., 1999), 8 — ALFALFA (Хайнс и др., 2018) и 9 — 2MRS (Донг и др., 2012).

> 3 mJy/beam) по данным VLASS обнаруживаются у квазара SRGeJ144924.5+321815. Необходимо отметить, что вариации блеска АЯГ носят стохастический характер и регистрируемые собственные движения вследствие изменения фотоцентра, связанные с физическими процессами в данных системах, в будущем могут поменять направление, либо вовсе прекратиться.

В заключение отметим, что в данной работе

мы использовали готовые астрометрические решения Gaia, опубликованные в каталоге EDR3. При выборе того или иного сценария, объясняющего значительные величины видимого собственного движения АЯГ, необходим анализ треков объектов на небе с использованием положений источников, измеренных Gaia в разные эпохи. Такой анализ планируется представить в будущих публикациях. Критическую роль также играют спектрофото-



**Рис. 5.** Характеристики качества астрометрических решений для каталога близких звезд (слева) и объектов из выборки протяженных источников (справа). На обеих панелях показаны только объекты, для которых параметр значимости избытка шума  $D > 2$ . На правой панели показаны объекты нашей Галактики (синие кружки), объекты, чья внегалактическая природа подтверждена оптической спектроскопией (оранжевые кружки) и неотожествленные в Simbad объекты вместе с галактиками без спектральных наблюдений (светло-зеленые кружки). Пунктирной линией показан уровень отношения  $l/\epsilon_i = 5.0$ . Масштаб одинаков на обоих рисунках.

метрические наблюдения объектов, которые будут продолжены на РТТ-150 и других телескопах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя измерения собственных движений и величину фактора цветового избытка по данным Gaia, мы выделили из каталога рентгеновских звезд телескопа eРОЗИТА немногочисленную группу пекулярных объектов. Их необычность по данным Gaia определяется тем, что, с одной стороны, они обладают статистически значимыми измерениями параллакса и/или собственного движения, а с другой, большие значения цветового избытка  $C^*$  свидетельствуют об их протяженности. Выборка включает 502 таких объекта. На диаграмме  $F_X/F_{opt}$ —цвет G—RP они располагаются в стороне от основной массы звезд, в области, более характерной для галактик и АЯГ. По данным Simbad 251 источник являются внегалактическими и имеют красное смещение, измеренное спектроскопическими методами, 6 источников являются известными галактическими объектами, а 206 объектов в Simbad отсутствуют. Оптическая протяженность у 122 из последних подтверждена визуально по данным ПанСтарс.

Для 19 объектов, не имеющих отождествления в базе данных Simbad, в период с сентября по октябрь 2022 г. мы провели спектральные наблюдения низкого разрешения на 1.5-м телескопе РТТ-150. Обнаружено 18 ранее неизвестных АЯГ с красными смещениями от 0.0155 до 0.272, а их

собственные движения по данным Gaia находятся в интервале от 0.9 до 8.8 милли угл. сек/год. Один источник оказался M-звездой с сильной эмиссионной линией H $\alpha$ . Вместе с шестью галактическими источниками, отождествленными с помощью Simbad, доля подтвержденных Галактических источников в нашей выборке составляет  $\approx 1.4\%$ .

Каталог протяженных источников с собственным движением будет опубликован в одной из последующих работ. До публикации каталога он может быть предоставлен заинтересованным ученым, исследующим такие объекты, по их запросу. Запросы следует направлять первому автору статьи.

Это исследование основано на наблюдениях телескопа eРОЗИТА на борту обсерватории 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). Рентгеновский телескоп СРГ/eРОЗИТА изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (МРЕ) при поддержке 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. Используемые в настоящей работе данные телескопа eРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом eРОЗИТА и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа SRG/eРОЗИТА. Авторы благодарны ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталии).

Работа И.М. Хамитова, И.Ф. Бикмаева, М.А. Горбачева, Э.Н. Иртуганова выполнена за счет субсидии Минобрнауки РФ № 671-2020-0052, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности. М.Р. Гильфанов, П.С. Минаев и Р.А. Сюняев благодарят поддержку гранта РНФ 21-12-00343.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абазжян и др. (K.N. Abazajian, J.K. Adelman-McCarthy, M.A. Agüeros, S.S. Allam, C. Allende Prieto, D. An, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **182**, 543 (2009).
2. Алам и др. (S. Alam, F.D. Albareti, C. Allende Prieto, F. Anders, S.F. Anderson, T. Anderton, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, id.12,27 (2015).
3. Ан и др. (C.P. Ahn, R. Alexandroff, C. Allende Prieto, S.F. Anderson, T. Anderton, B.H. Andrews, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **203**, id.21,13 (2012).
4. Бельведерский М.И., Быков С.Д., Гильфанов М.Р., Письма в *Астрон. журн.*, готовится в печать, **49** (2022).
5. Бруннер и др. (H. Brunner, T. Liu, G. Lamer, A. Georgakakis, A. Merloni, M. Brusa, et al.), *Astron. Astrophys.* **661**, A1 (2022).
6. Ванг и др. (L.-L. Wang, S.-Y. Shen, A.L. Luo, G.-J. Yang, N. Gai, Y.-K. Tang, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **258**, id.9,10 (2022).
7. Гордон и др. (Y.A. Gordon, M.M. Boyce, C.P. O’Dea, L. Rudnick, H. Andernach, A.N. Vantighem, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **255** (2021).
8. Джонс и др. (D.H. Jones, M.A. Read, W. Saunders, M. Colless, T. Jarrett, Q.A. Parker, et al.), *MNRAS* **399**, 683 (2009).
9. Донг и др. (J.P. Huchra, L.M. Macri, K.L. Masters, T.H. Jarrett, P. Berlind, M. Calkins, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, id.26,22 (2012).
10. Донг и др. (X.Y. Dong, X.-B. Wu, Y.L. Ai, J.Y. Yang, Q. Yang, F. Wang, et al.), *Astron. J.* **155**, id.189,13 (2018).
11. Оке (J.B. Oke), *Astron. J.* **99**, 1621 (1990).
12. Пределль и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1, 16 (2021).
13. Риелло и др. (M. Riello, F. De Angeli, D.W. Evans, P. Montegriffo, J.M. Carrasco, G. Busso, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, id.A3,33 (2021).
14. Сообщество Гайа (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021).
15. Сообщество Гайа (Gaia Collaboration, C.A.L. Bailer-Jones, D. Teysier, L. Delchambre, C. Ducourant, D. Garabato, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2206.05681 (2022a).
16. Сообщество Гайа (Gaia Collaboration, S.A. Klioner, L. Lindegren, F. Mignard, J. Hernandez, M. Ramos-Lerate, et al.), *Astron. Astrophys.*, 667, id.A148,31 (2022b).
17. Суше и др. (J. Souchay, N. Secrest, S. Lambert, N. Zacharias, F. Taris, C. Barache, et al.), *Astron. Astrophys.* **660**, A16, 1 (2022).
18. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Vogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132, 29 (2021).
19. Титов и др. (O. Titov, S. Frey, Melnikov, S. Lambert, F. Shu, B. Xia, et al.), *MNRAS*, **512**, 874 (2022).
20. Фалько и др. (E.E. Falco, M.J. Kurtz, M.J. Geller, J.P. Huchra, J. Peters, P. Berlind, et al.), *PASP* **111**, 438 (1999).
21. Хайнс и др. (M.P. Haynes, R. Giovanelli, B.R. Kent, E.A.K. Adams, T.J. Balonek, D.W. Craig, et al.), *Astrophys. J.* **861**, id.49,19 (2018).
22. Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:1612.05560 (2016).
23. Шимвелл и др. (T.W. Shimwell, C. Tasse, M.J. Hardcastle, A.P. Mechev, W.L. Williams, P.N. Best, et al.), *Astron. Astrophys.* **622**, A1,21 (2019).