

Том 49, Номер 6

ISSN 0320-0108

Июнь 2023



ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Астрономия и космическая астрофизика

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 49, номер 6, 2023

Транзиентные события в окрестностях АЯГ и квазаров как источники имитаций собственных движений

*И. М. Хамитов, И. Ф. Бикмаев, М. Р. Гильфанов, Р. А. Сюняев,
П. С. Медведев, М. А. Горбачев*

369

What Can We Learn about Compton-thin AGN Tori from Their X-Ray Spectra?

F. Melazzini, S. Sazonov

399

Определение скорости вращения спирального узора Млечного пути по молодым рассеянными звездным скоплениям

В. В. Бобылев, А. Т. Байкова

401

Определение параметров нелинейной кинематической модели вращения Галактики на базе собственных движений и лучевых скоростей звезд каталога GAIA DR3

А. С. Цветков, Ф. А. Амосов

412

Азимутальные структуры в планетезимальных околозвездных дисках

Т. В. Демидова, И. И. Шевченко

426

ТРАНЗИЕНТНЫЕ СОБЫТИЯ В ОКОЛОЯДЕРНЫХ ОБЛАСТЯХ АЯГ И КВАЗАРОВ КАК ИСТОЧНИКИ ИМИТАЦИЙ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ

© 2023 г. И. М. Хамитов^{1,2*}, И. Ф. Бикмаев^{1,2}, М. Р. Гильфанов^{3,4},
Р. А. Сюняев^{3,4}, П. С. Медведев³, М. А. Горбачев^{1,2}

¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²Академия наук Татарстана, Казань, Россия

³Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁴Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 05.07.2023 г.

После доработки 07.07.2023 г.; принята к публикации 07.07.2023 г.

Настоящая работа представляет собой расширение исследования Хамитова и др. (2022) в части каталога и астрофизической интерпретации имитации значимых собственных движений в галактиках с активными ядрами и квазарах по данным космической обсерватории Gaia. Представлена выборка рентгеновских источников СРГ/еРозита, расположенных в восточной галактической полусфере ($0^\circ < l < 180^\circ$), имеющих значительные собственные движения в измерениях Gaia eDR3, с подтвержденной внегалактической природой объектов. Каталог состоит из 248 внегалактических источников со спектрально измеренными красными смещениями. В каталог вошли все объекты, имеющиеся в базе данных Simbad и совпадающие с отождествленным оптическим компонентом в пределах радиуса 0.5 угл. сек. Дополнительно в каталог включены 18 источников со спектральными измерениями красного смещения по наблюдениям на российско-турецком 1.5-м телескопе РТТ-150 (Хамитов и др., 2022). Источники каталога — это АЯГ различных типов (Sy1, Sy2, LINER), квазары, радиогалактики и галактики со звездообразованием. Имитация значительных собственных движений может быть объяснена (ранее известным в астрометрии VIM-эффектом) наличием транзитных событий на луче зрения в окрестности ядер АЯГ и квазаров (в пределах элемента оптического разрешения Gaia). К числу таких астрофизических событий могут быть отнесены вспышки Сверхновых, события приливного разрушения звезд в АЯГ с двойными ядрами, переменность сверхгигантов большой массы, наличие О-В ассоциаций на фоне АЯГ переменной яркости и др. Модель вспышек с профилем быстрого нарастания блеска и экспоненциального затухания позволяет описать наблюдаемые в Gaia переменные позиционные параметры большинства источников. Этот подход может использоваться как независимый способ обнаружения транзитных событий в окрестностях ядер АЯГ (на масштабах в несколько сот парсек в картинной плоскости) по данным каталогов рентгеновских источников обсерватории СРГ/еРОЗИТА и оптического каталога обсерватории Gaia.

Ключевые слова: рентгеновские источники, активные ядра галактик, собственные движения, каталог, транзитные события.

DOI: 10.31857/S0320010823060037, **EDN:** GOLHNW

ВВЕДЕНИЕ

Клионер и др. (2022), Суше и др. (2022), Макаров, Секрест (2022) и Хамитов и др. (2022) привели в своих статьях списки квазаров — точечных объектов, не разрешаемых спутником Gaia, но являющихся внегалактическими согласно их наблюдаемому красному смещению, с большими

пекулярными движениями согласно астрометрическим измерениям Gaia (Браун и др., 2021). В системе координат внегалактических источников наблюдаемые амплитуды собственных движений соответствуют перемещениям вещества со скоростями, превышающими скорость света в десятки и сотни раз. Имитация наблюдаемых собственных движений у АЯГ и квазаров вероятнее всего является проявлением хорошо известного VIM-

*Электронный адрес: irek_khamitov@hotmail.com

эффекта (variability-induced-movers), обусловленного переменностью источников. Первоначально метод исследования следствий эффекта был разработан для анализа данных космической астрометрической миссии Hipparcos (Виелен, 1996). Он был направлен на поиск двойных звезд в неразрешенных изображениях при рассмотрении, что либо один из источников переменный по яркости, либо имеется заметное орбитальное движение в двойной системе за время работы миссии. Беспрецедентная позиционная точность, глубина обзоров всего неба и длительность стабильной работы миссии Gaia привели к массовому обнаружению проявлений VIM-эффекта в оптике во внегалактических источниках. Наблюдаемые амплитуды собственных движений АЯГ и квазаров на несколько порядков превышают случаи, когда изменения фотоцентра происходят за счет крупномасштабных изменений в аккреционном диске и пылевом торе, окружающем центральную черную дыру, либо обусловленных влиянием первичных гравитационных волн или анизотропного расширения Вселенной, а также микролинзирования (см. Суше и др., 2022, и ссылки там). В работе Попович и др. (2012) рассмотрена модель релятивистского диска вокруг сверхмассивной черной дыры (СМЧД), включающей возмущения, приводящие к появлению отдельной области диска и, следовательно, к смещению положения фотоцентра. Было показано, что в данных Gaia результат перестройки внутренней структуры аккреционного диска может приводить к смещению фотоцентра до нескольких mas (милли угл. сек), но только для ярких квазаров на малых красных смещениях. Также, в указанной работе предложенная модель была использована к долгосрочным наблюдениям выборки из 20 квазаров, проявляющим значительную переменность фотоцентра. Для случаев SDSS J121855.80+020002.1 и Mrk 877 модель оказалась недостаточной и обсуждались возможность взрыва Сверхновых звезд очень близко к центральному источнику АЯГ и возможное указание на бинарную систему СМЧД в масштабе кпк (пк). Макаров и Секреср (2022) сравнением каталогов MIRAGN и Gaia eDR3 выделили список 44 кандидатов двойных и мульти-системных квазаров с собственными движениями и 4 известные гравитационно-линзированных системы. Выдвинуто предположение, что многие квазары с собственным движением могут быть более тесными, неразрешенными двойными системами, демонстрирующими VIM-эффект, а меньшая часть может быть случайными совпадениями со звездами переднего плана, вызывающими слабое гравитационное линзирование. В работе Пирс и др. (2023) показано, что взаимодействие галактик является доминирующим механизмом запуска квазарной активности в местной Вселенной. Показано, что

хозяйские галактики с квазарами второго типа в ~66% демонстрируют морфологические особенности, соответствующие слияниям либо столкновениям галактик. В отличие от идеи, что квазары запускаются на пиках слияния галактик, когда два ядра объединяются, и становятся видимыми только после полного слияния, большинство морфологически возмущенных квазаров второго типа в выборке из работы Пирс и др. (2023) наблюдаются в стадии до фазы полного слияния ($61^{+8}_{-9}\%$).

Обнаружение АЯГ со смещением положения источников на масштабе до нескольких mas, измеренных по радиоданным VLBI по отношению к измерениям Gaia в направлениях вдоль, а также противоположными джету, указывают на наличие сильных, протяженных оптических струйных структур на масштабах парсек в этих системах (Ковалев и др., 2017). Исследования показали, что излучающие размеры сильного оптического джета, требуемого для объяснения смещения VLBI-Gaia, должны быть не менее 20–50 пк (Плавин и др., 2019). Дифференциальные изменения яркости в такого рода джетах могут приводить к наблюдаемому VIM-эффекту в данных Gaia. Выбросы, яркие в оптике, с ультрарелятивистскими собственными движениями наблюдались и в ближайшей мощной радиогалактике M87 (Биретта и др., 1999), где телескоп им. Хаббла позволил наблюдать перемещения деталей в изображении джета с видимыми скоростями до 6–8 скоростей света. Суше и др. (2022) вкратце исследовали оба вышеперечисленных сценария и пришли к выводу, что активность радиоджетов не может быть основным фактором, влияющим на видимое собственное движение в квазарах в оптике.

В работе Хамитов и др. (2022) сообщается о выборке 502 внегалактических рентгеновских источников, обнаруженных телескопом ePOZITA (Предел и др., 2021) космической обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (Сюняев и др., 2021) в восточном галактическом полушарии, за обработку данных на котором отвечает российский консорциум телескопа ePOZITA ($0^\circ < l < 180^\circ$), и для которых спутником Gaia измерены значимые величины собственных движений. Подавляющая часть этих источников принадлежит к протяженным оптическим источникам по данным Gaia и лишь около 1.5% из них являются звездами нашей Галактики. С привлечением базы данных Simbad было показано (Хамитов и др., 2022), что внегалактическая природа подтверждается примерно для половины из указанных 502 источников. Для оставшейся половины необходимы дополнительные спектроскопические наблюдения с целью определения их красных смещений и оптической идентификации. Такая работа выполняется авторами статьи: по наблюдениям на 1.5-м оптическом

российско-турецком телескопе РТТ-150 (Государственная обсерватория ТЮБИТАК, Анталя, Турция) ранее уже подтверждена внегалактическая природа 18-ти источников из второй половины списка (Хамитов и др., 2022). В настоящей работе приводится Каталог 248 рентгеновских источников eРОЗИТА, обсуждаемых в работе Хамитова и др. (2022), для которых имеются спектроскопические определения красных смещений и оптическая классификация. В каталог вошли все объекты, имеющиеся в базе данных Simbad и совпадающие с отождествленным оптическим компонентом в пределах радиуса 0.5 угл. сек, а также по спектральным наблюдениям, проведенным на телескопе РТТ-150. Дополнительным критерием отбора источников было их отсутствие среди объектов Gaia DR3 с ложным сигналом временной серии по положению, связанными с зависящим от времени углом сканирования объектов детекторами Gaia (Холл и др., 2023). Каталог может быть использован в дальнейшем с целью поиска и анализа причин значимых собственных движений по данным спутника Gaia, из которых формально следуют движения вещества в этих источниках со значительными превышениями скорости света.

В нижеследующих таблицах мы приводим дополнительный список 12 квазаров, 2 блазаров и 4 радиогалактик из рентгеновского каталога телескопа СРГ/eРОЗИТА, имеющих большие пекулярные движения согласно данным спутника Gaia. Многие блазары и часть квазаров демонстрируют наличие мощных оптических джетов.

Но в наш каталог внегалактических объектов с большими собственными движениями вошли не только квазары или мощные АЯГ и радиогалактики, но и другие системы. Например, галактики с мощным звездообразованием, природа которых едва ли связана с наличием мощных оптических джетов, представляют самостоятельный интерес. Вполне может оказаться, что в этих объектах с часто вспыхивающими сверхновыми измеренные большие собственные скорости центральной области галактик объясняются смещением центра яркости галактики из-за вспышки яркой сверхновой на заметном удалении от центра яркости галактики. Возможно, что по такой же причине (вспышка яркой сверхновой в окружающей галактике) может сдвигаться на время и центр яркости галактики с АЯГ, что отражается на результатах наблюдений Gaia.

Явление приливного разрушения звезд сверхмассивной черной дырой также может сделать на время порядка года аккреционный диск вокруг черной дыры более ярким, чем вся галактика для далекого наблюдателя, и по многим причинам привести к сдвигу ее центра яркости, причем к существенным значениям для двойных систем. Очевидно, что при

таком мощном энерговыделении могут иногда образовываться и яркие оптические джеты с ультрарелятивистскими скоростями.

Мы разделили ниже объекты полученного нами каталога по их типам, чтобы специалисты могли быстрее найти объекты интересные для них. Обнаруженная Gaia имитация сильного собственного движения протяженных внегалактических объектов может привести к интересным и неожиданным выводам о физических процессах, приводящих к такой имитации.

Для описания наблюдательных параметров каталога Gaia — астрометрического шума (`astrometric_excess_noise`) и отношения полного смещения источника к данному шуму — рассмотрено влияние на фотоцентр вспышки с профилем быстрого нарастания блеска и экспоненциального затухания, произошедшей на заданном расстоянии от ядра.

КАТАЛОГ

Спектроскопические определения красных смещений имеются для 248 объектов. Каталог представлен в виде одной общей идентификационной табл. 1 и девяти таблиц (табл. 2–10) с рентгеновскими характеристиками, разбитых по общим типам объектов: квазары — 11 источников; блазары — 2 источника; радиогалактики (Galaxy R) — 4 источника; Сейфертовские галактики 1-го типа — 106 источников; Сейфертовские галактики 2-го типа — 32 источника; АЯГ типа LINER — 11 источников; АЯГ неопределенного типа — 25 источников; галактики со звездообразованием (SF) — 15 источников и галактики с неопределенным типом — 42 источника. Идентификационная таблица упорядочена по прямому восхождению, в то время как внутри рентгеновских таблиц объекты приведены в порядке убывания модуля собственного движения по данным Gaia eDR3.

Идентификационная таблица состоит из девяти столбцов: 1) идентификационный номер в каталоге СРГ/eРОЗИТА; 2) идентификационный номер в каталоге Gaia eDR3; 3) RA (J2000.0); 4) DEC (J2000.0); 5) модуль собственного движения с ошибкой его измерения в единицах мили угл. сек; 6) красное смещение; 7) тип источника; 8) отождествление в базе данных Simbad; 9) код ссылки на статью, из которой получена информация о красном смещении.

Таблица 1. Каталог

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J000310.1+044455	2741905339356533504	00 03 10.02	+04 44 56.2	1.94 ± 0.51	0.058	Sy2	2MASXJ00030999+0444564	2003A&A...412...45P
J001124.6+380935	2877771750682930176	00 11 24.46	+38 09 33.7	5.72 ± 1.48	0.137	AGN	None	2022AsL...48..724K
J002848.8+145216	2780286129184910208	00 28 48.78	+14 52 16.3	3.29 ± 0.77	0.089	Sy1	2MASXJ00284876+1452156	2012ApJS...203...21A
J002936.8–173833	2367248023501811840	00 29 36.79	–17 38 30.4	3.85 ± 0.30	0.054	Galaxy	2MASXJ00293678–1738306	2009MNRAS...399..683J
J003246.0–193931	2363442270160564480	00 32 46.03	–19 39 30.4	3.12 ± 0.85	0.054	Galaxy	2MASXJ00324605–1939303	2009MNRAS...399..683J
J003415.5–274813	2319321445518636928	00 34 15.47	–27 48 12.7	3.69 ± 0.44	0.005	Galaxy SF	NGC150	2012ApJS...203...21A
J003826.9–000039	2543175415864489472	00 38 26.67	–00 00 42.7	2.99 ± 0.68	0.045	Galaxy	MCG+00–02–101	2012ApJS...203...21A
J004447.5+152910	2781106124341566976	00 44 47.34	+15 29 11.9	6.51 ± 1.17	0.227	Sy1	SDSSJ004447.33+152911.8	2012ApJS...203...21A
J005055.9+293325	311984160934363392	00 50 55.69	+29 33 28.1	4.56 ± 0.71	0.136	QSO	2MASXJ00505570+2933281	2011MNRAS...414..500H
J010812.2+854152	573881985223210368	01 08 11.86	+85 41 50.7	3.35 ± 0.60	0.077	Sy2	None	2022AsL...48..724K
J010816.3–113401	2469702471186911616	01 08 16.31	–11 34 01.0	2.85 ± 0.58	0.047	Galaxy	2MFGC829	2009MNRAS...399..683J
J011014.2+501030	403565954748186496	01 10 14.06	+50 10 31.0	2.81 ± 0.65	0.024	Sy	2MASXJ01101406+5010313	2003A&A...412...45P
J011711.2–220903	23516233444795628544	01 17 11.23	–22 09 03.6	1.52 ± 0.32	0.090	Galaxy	2MASXJ01171123–2209037	2009MNRAS...399..683J
J011959.3+144712	2591270390924029056	01 19 59.60	+14 47 10.4	4.83 ± 0.52	0.014	Galaxy R	NGC471	2018ApJ...861...49H
J012048.0–082918	2472133530051650048	01 20 48.01	–08 29 18.4	4.10 ± 0.71	0.034	AGN	MCG–02–04–026	2005PASA...22..277J
J012531.6+320811	316434743485650560	01 25 31.46	+32 08 10.5	1.62 ± 0.40	0.016	Sy2	Mrk993	2018ApJ...861...49H
J013435.8+022837	2558952819311344256	01 34 35.91	+02 28 39.9	3.51 ± 0.68	0.177	QSO	2MASXJ01343589+0228397	2018A&A...613A..51P
J014238.5–045140	2480153505303646080	01 42 38.57	–04 51 41.1	2.98 ± 0.65	0.040	Galaxy	2MASXJ01423859–0451414	2003AJ....126.2152R
J014417.5+314004	303683913296921728	01 44 17.27	+31 40 03.3	9.32 ± 1.93	0.124	QSO	SDSSJ014417.27+314003.3	2020ApJS...250....8L
J014458.6–023200	2505449660085848576	01 44 58.56	–02 31 59.0	1.98 ± 0.24	0.096	Galaxy	2MASXJ01445853–0231589	2009MNRAS...399..683J
J014916.6+851529	573798735870700032	01 49 18.04	+85 15 37.2	4.15 ± 1.10	0.004	Galaxy	UGC1198	2003A&A...412...45P
J020436.8–115942	5151365323643149568	02 04 36.76	–11 59 43.4	1.76 ± 0.29	0.073	Sy1	2MASXJ02043675–1159432	2009MNRAS...399..683J
J021049.7+240709	104209409979045376	02 10 49.38	+24 07 06.7	2.71 ± 0.60	0.144	Sy1	None	2022AsL...48..724K

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J021257.5+140609	77274609208701824	02 12 57.60	+14 06 10.2	3.66 ± 0.41	0.062	Sy1	2MASXJ02125762+1406105	2012ApJS..203...21A
J022534.1+264400	103529675570132992	02 25 33.77	+26 44 01.7	4.86 ± 0.66	0.035	Galaxy	UGC1881A	2018MNRAS.474.1873W
J023800.0+193812	87823358125418112	02 37 59.99	+19 38 11.8	1.68 ± 0.44	0.034	Galaxy	LEDA1599918	2018ApJ...861...49H
J024012.2-023344	2495867038292625280	02 40 12.22	-02 33 44.4	2.73 ± 0.39	0.043	Galaxy	2MASXJ02401221-0233438	2009MNRAS.399..683J
J024443.5+204136	85364953204844416	02 44 43.31	+20 41 38.6	1.79 ± 0.46	0.051	Sy2	None	2022AstL...48..724K
J032006.4+402200	236265399336163328	03 20 06.32	+40 21 58.7	2.55 ± 0.62	0.047	Sy1	2MASXJ03200634+4021583	2020ApJS..249....3A
J032513.1+404154	236149950616287360	03 25 12.95	+40 41 52.8	3.45 ± 0.75	0.047	Sy2	LEDA97012	2020A&A...640A..30M
J040550.9+813716	569719612155006208	04 05 51.36	+81 37 17.2	1.97 ± 0.41	0.118	Sy1	None	2022AstL...48..724K
J043122.0+605458	472342743530601984	04 31 22.51	+60 55 00.2	7.50 ± 0.79	0.015	Galaxy	2MASXJ04312250+6055002	2011MNRAS.416.2840L
J044110.7+683728	495873426235161344	04 41 11.00	+68 37 29.3	3.87 ± 0.66	0.120	AGN	None	2022AstL...48..724K
J050808.7+700529	497736754846822656	05 08 09.16	+70 05 30.1	5.93 ± 0.63	0.028	Galaxy	2MASXJ05080919+7005304	2000MNRAS.317...55S
J051316.6+662751	482638261175017216	05 13 16.43	+66 27 50.2	5.12 ± 0.94	0.015	Galaxy	2MASXJ05131637+6627498	1999PASP.111..438F
J053532.1+401116	191176111110250752	05 35 32.13	+40 11 15.8	1.15 ± 0.23	0.021	Sy1	LEDA2161985	2014A&A...561A..67P
J053821.8+793515	553597546173225216	05 38 23.46	+79 35 12.7	4.27 ± 0.60	0.015	AGN	None	1999PASP.111..438F*
J062329.3+691238	1106940173151909888	06 23 29.08	+69 12 32.6	4.54 ± 0.92	0.055	AGN	None	2022AstL...48..724K
J063147.1+655440	1104230151864373888	06 31 47.43	+65 54 42.5	1.97 ± 0.44	0.108	AGN	None	2022AstL...48..724K
J063709.8+535349	994274591039680768	06 37 09.94	+53 53 46.1	3.41 ± 0.50	0.034	Galaxy	2MASXJ06370993+5353466	1999MNRAS.308..897L
J065236.7+454651	954117334016424064	06 52 36.99	+45 46 50.2	4.90 ± 0.78	0.021	Sy2	MCG+08-13-022	2002LEDA.....0P
J070634.5+635057	1099887149653797120	07 06 34.82	+63 50 56.1	2.58 ± 0.27	0.014	Galaxy	UGC3660	2003A&A...412...45P
J072528.5+434332	973218805928899584	07 25 28.48	+43 43 32.3	3.52 ± 0.91	0.069	Sy1	2MASXJ07252851+4343319	2012ApJS..203...21A
J072546.6+531200	986865806813601408	07 25 46.68	+53 11 59.1	0.94 ± 0.20	0.039	Galaxy	2MASXJ07254669+5311598	2000AJ....120.2338R
J074008.9+800356	1142233981003897984	07 40 08.90	+80 03 57.1	1.91 ± 0.34	0.087	Sy1	2E1829	1991ApJS...76..813S
J075244.3+455658	926582333041407616	07 52 44.21	+45 56 57.4	1.29 ± 0.34	0.052	BLL	2MASXJ07524421+4556576	2012ApJS..203...21A

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J080435.2+504231	935042422181701248	08 04 35.51	+50 42 30.7	3.71 ± 0.87	0.023	AGN	2MASXJ08043556+5042305	2015ApJS..219...12A
J090436.8+553603	1035985561071454080	09 04 36.95	+55 36 02.7	1.57 ± 0.15	0.037	Sy1	2MASXJ09043699+5536025	2012ApJS..203...21A
J090554.9+471046	1012216456141389440	09 05 54.50	+47 10 45.5	4.08 ± 0.77	0.027	LINER	UGC4765	2012ApJS..203...21A
J091118.8+462311	1011377902430454016	09 11 18.96	+46 23 07.2	7.93 ± 0.99	0.103	LINER	2MASXJ09111899+4623069	2012ApJS..203...21A
J092108.6+445452	818703921480587904	09 21 08.59	+44 54 50.8	1.66 ± 0.36	0.156	Sy1	2MASSJ09210857+4454507	2012ApJS..203...21A
J095033.0+441850	820500351682252544	09 50 33.15	+44 18 51.6	1.76 ± 0.35	0.016	AGN	NGC3010	2012ApJS..203...21A
J101148.0+504959	848092733419805696	10 11 48.35	+50 50 00.5	2.62 ± 0.70	0.079	Sy1	2MASXJ10114829+5050007	1995MNRAS.277.1312C
J101653.5+732404	1078032981660206080	10 16 53.65	+73 24 02.7	3.44 ± 0.73	0.009	Sy2	NGC3147	2003A&A...412...45P
J101739.0+420059	805227344901870592	10 17 38.72	+42 01 03.3	3.94 ± 0.32	0.107	Sy1	2MASSJ10173874+4201035	2009ApJS..182..543A
J102233.8+582706	1047191130746301824	10 22 33.70	+58 27 04.9	1.33 ± 0.32	0.077	Sy1	2MASXJ10223371+5827044	2012ApJS..203...21A
J104118.9+574501	854381974290712960	10 41 19.22	+57 45 00.1	1.13 ± 0.28	0.068	Sy2	2MASXJ10411919+5745000	2012ApJS..203...21A
J105057.2+593213	861390055247564800	10 50 57.29	+59 32 14.5	1.41 ± 0.19	0.085	Sy1	2MASXJ10505729+5932144	2012ApJS..203...21A
J105946.4+455409	783159424976854784	10 59 46.68	+45 54 09.7	1.39 ± 0.31	0.179	AGN	2MASSJ10594667+4554098	2012ApJS..203...21A
J110241.8+420655	778252648175937920	11 02 41.47	+42 06 51.9	7.02 ± 0.90	0.075	Sy1	2MASXJ11024141+4206516	2012ApJS..203...21A
J110503.8+505951	839151745380126336	11 05 04.21	+50 59 49.9	9.43 ± 1.30	0.118	Sy1	LEDA2386530	2012ApJS..203...21A
J110647.5+723407	1075615563616899328	11 06 47.46	+72 34 07.3	1.57 ± 0.17	0.009	Sy1	NGC3516	2016ApJ...818..113N
J110919.8+714233	1075317668976901504	11 09 19.75	+71 42 33.4	1.20 ± 0.25	0.130	Sy1	RXJ1109.2+7142	2001AJ....121.2843B
J111705.3+470212	788576821855898624	11 17 05.21	+47 02 14.3	3.38 ± 0.56	0.188	Sy1	2MASSJ11170521+4702148	2012ApJS..203...21A
J112218.0+590430	857620963746780032	11 22 17.90	+59 04 28.3	1.88 ± 0.43	0.005	LINER	NGC3642	2016A&A...595A.118V
J112348.0+465649	788713260068770048	11 23 48.04	+46 56 50.1	2.08 ± 0.46	0.157	Sy1	2MASSJ11234805+4656501	2012ApJS..203...21A
J112958.2+462100	785529662805821312	11 29 57.95	+46 20 59.5	1.29 ± 0.33	0.210	Sy1	LAMOSTJ112957.96+462059.5	2012ApJS..203...21A
J113234.9+530404	841054411602049280	11 32 34.85	+53 04 04.5	3.01 ± 0.61	0.003	Galaxy	NGC3718	2017ApJ...850...74K
J113925.5+451345	773886418783213312	11 39 25.56	+45 13 46.7	3.38 ± 0.51	0.127	Sy1	2MASXJ11392557+4513464	2012ApJS..203...21A

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J114432.7+613157	859916984543634688	11 44 33.06	+61 32 00.7	1.41 ± 0.29	0.048	Sy1	MCG+10-17-057	2012ApJS..203...21A
J114958.1+575108	845401781789519872	11 49 58.09	+57 51 07.7	1.06 ± 0.28	0.100	Sy1	2MASXJ11495809+5751081	2012ApJS..203...21A
J115107.2+550441	841656192350581376	11 51 06.87	+55 04 43.4	3.85 ± 0.90	0.020	Galaxy	NGC3921	2003A&A...412...45P
J120215.3+440321	1537913095891025152	12 02 15.46	+44 03 19.7	3.80 ± 0.72	0.101	LINER	2MASXJ12021545+4403194	2009ApJS..182..543A
J120655.4+501736	1546702115107564160	12 06 55.63	+50 17 37.2	3.03 ± 0.48	0.061	Sy1	MCG+08-22-071	2012ApJS..203...21A
J121049.6+392821	1535810559076616192	12 10 49.61	+39 28 22.1	3.54 ± 0.62	0.022	LINER	NGC4156	2012ApJS..203...21A
J121607.1+504930	1547527676538572288	12 16 07.10	+50 49 30.1	0.67 ± 0.17	0.031	Sy1	Mrk1469	2012ApJS..203...21A
J121651.9+375437	1532384923225589120	12 16 51.77	+37 54 38.1	3.50 ± 0.46	0.063	Sy2	2E2635	2012ApJS..203...21A
J121745.9+534902	1572288300437823616	12 17 45.79	+53 49 02.4	2.02 ± 0.49	0.194	Sy1	2MASXJ12174579+5349023	2012ApJS..203...21A
J123152.1+450442	1541584713109631744	12 31 52.05	+45 04 43.1	1.29 ± 0.16	0.062	Sy1	2MASXJ12315204+4504428	2012ApJS..203...21A
J123429.8+621808	1583600827682206080	12 34 29.86	+62 18 06.2	0.84 ± 0.22	0.135	Sy1	LEDA3096159	2012ApJS..203...21A
J123503.3+662236	1680638849162446592	12 35 02.66	+66 22 33.5	5.41 ± 0.75	0.047	Galaxy SF	Mrk217	2009ApJS..182..543A
J123553.8+424117	1534546494366340992	12 35 53.51	+42 41 21.0	4.44 ± 0.92	0.155	Sy1	2MASXJ12355351+4241207	2009ApJS..182..543A
J123740.2+611148	1580153004031345920	12 37 40.72	+61 11 48.6	4.10 ± 0.67	0.181	Sy1	2MASXJ12374071+6111483	2012ApJS..203...21A
J124235.8+780719	1717177201102073856	12 42 36.10	+78 07 20.4	4.30 ± 0.74	0.022	Sy1	LEDA140000	1996ApJS..106..341M
J124310.7+731600	1689898970452126080	12 43 11.22	+73 15 59.3	4.96 ± 0.76	0.075	Galaxy R	NVSSJ124310+731600	2002MNRAS..329..700S
J124412.0+504201	1567789305015908352	12 44 12.06	+50 42 02.0	1.67 ± 0.41	0.216	Sy1	2MASXJ12441206+5042020	2012ApJS..203...21A
J124441.5+374023	1520417980403049728	12 44 41.48	+37 40 25.1	3.24 ± 0.87	0.166	Sy1	2MASXJ12444144+3740249	2012ApJS..203...21A
J124612.1+410813	1522139094057902464	12 46 12.11	+41 08 11.9	0.73 ± 0.15	0.067	Sy1	LEDA140004	2012ApJS..203...21A
J124617.4+282033	3962816210617909760	12 46 17.34	+28 20 33.9	5.35 ± 0.85	0.100	Sy2	2MASXJ12461737+2820343	2009ApJS..182..543A
J130041.0+523217	1558036602517231360	13 00 40.78	+52 32 15.8	4.20 ± 0.86	0.054	Galaxy SF	2MASXJ13004073+5232155	2012ApJS..203...21A
J130301.0+403840	1527295150757420160	13 03 01.05	+40 38 40.6	1.23 ± 0.29	0.067	Sy1	2MASXJ13030101+4038401	2012ApJS..203...21A
J130422.3+361542	1516302989417814144	13 04 22.19	+36 15 43.2	2.31 ± 0.45	0.045	Sy2	2MASXJ13042219+3615428	2012ApJS..203...21A

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J130702.9+563155	1564940504747175296	13 07 02.89	+56 31 58.4	3.09 ± 0.46	0.081	Sy1	MCG+10-19-033	2012ApJS..203...21A
J131056.2+444412	1529712564510717696	13 10 56.19	+44 44 13.6	0.92 ± 0.20	0.060	Sy1	[VV2006c]J131056.2+444413	2012ApJS..203...21A
J131118.5+463502	1553988166345499136	13 11 18.54	+46 35 02.3	14.94 ± 0.84	0.27	QSO	2MASSJ13111853+4635024	2009ApJS..182..543A
J131447.1+260624	1447726002515875712	13 14 47.07	+26 06 24.1	3.21 ± 0.29	0.072	Sy1	2MASXJ13144704+2606244	2012ApJS..203...21A
J131517.4+442422	1526644239872942592	13 15 17.26	+44 24 25.5	5.33 ± 1.46	0.035	Sy2	Mrk248	2012ApJS..203...21A
J132024.6+690011	1684884819471591552	13 20 24.61	+69 00 11.6	0.61 ± 0.14	0.067	Sy1	LEDA2726469	1993AJ....105.2079R
J132038.0+341128	1472901554617233664	13 20 37.89	+34 11 26.2	2.44 ± 0.32	0.064	AGN	2MASXJ13203789+3411258	2002AJ....123.3018M
J132811.7+622745	1663791754044480384	13 28 11.58	+62 27 43.0	2.33 ± 0.48	0.091	Sy2	2MASSJ13281159+6227431	2009ApJS..182..543A
J132946.5+553618	1565167485177736448	13 29 45.92	+55 36 13.4	1.35 ± 0.28	0.017	Galaxy SF	Mrk257	2012ApJS..203...21A
J133106.6+510929	1559600967046402048	13 31 06.88	+51 09 30.9	6.85 ± 1.26	0.179	Sy1	2MASSJ13310685+5109309	2012ApJS..203...21A
J133147.1+591048	1662178495608598656	13 31 47.08	+59 10 47.2	2.01 ± 0.42	0.043	Sy2	MCG+10-19-083	2012ApJS..203...21A
J133651.1+365018	1472091004093186432	13 36 50.95	+36 50 18.0	5.15 ± 0.76	0.062	Galaxy SF	2MASXJ13365093+3650182	2012ApJS..203...21A
J133804.5+394110	1499986305580569216	13 38 04.30	+39 41 10.1	2.16 ± 0.41	0.060	Sy2	2MASSJ13380430+3941102	2009ApJS..182..543A
J133826.9+321254	1468878922608713600	13 38 26.87	+32 12 52.7	1.95 ± 0.35	0.089	Sy1	2MASXJ13382685+3212524	2012ApJS..203...21A
J134208.5+353915	1471360967028205696	13 42 08.38	+35 39 15.5	0.32 ± 0.06	0.003	Sy1	NGC5273	2017ApJ...850...74K
J134220.2+384210	1496694299048016512	13 42 20.15	+38 42 09.7	3.02 ± 0.36	0.079	Sy1	2MASXJ13422018+3842096	2012ApJS..203...21A
J134330.0+510204	1558940057478251136	13 43 30.01	+51 02 04.1	2.93 ± 0.66	0.131	LINER	2MASSJ13433000+5102041	2009ApJS..182..543A
J134353.3+803549	1718748746815817472	13 43 52.89	+80 35 49.4	2.46 ± 0.46	0.045	AGN	2MASXJ13435300+8035495	1999PASP..111..438F
J134448.7+304420	1455742610513541376	13 44 48.63	+30 44 20.4	2.86 ± 0.48	0.077	Sy1	2MASXJ13444864+3044204	2020ApJS..249....3A
J134834.9+263110	1451327487212475776	13 48 34.95	+26 31 09.9	3.31 ± 0.38	0.059	Sy2	2E3140	2012ApJS..203...21A
J134915.1+220034	1251098139097279232	13 49 15.20	+22 00 32.6	0.86 ± 0.17	0.062	Sy1	LEDA1661730	2020ApJS..249....3A
J135317.5+332929	1458659683583166336	13 53 17.80	+33 29 27.0	2.01 ± 0.42	0.008	Sy2	NGC5347	2018ApJ...861...49H
J135420.0+325549	145785807088809856	13 54 19.95	+32 55 47.7	1.50 ± 0.41	0.026	Sy2	Mrk663	2015ApJS..219...12A

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J135620.6+264356	1450823498570440832	13 56 20.70	+26 43 54.4	8.86 ± 1.54	0.062	Sy1	LEDA1786612	2012ApJS..203...21A
J135830.7+200546	1246851481593437440	13 58 30.78	+20 05 51.2	2.84 ± 0.72	0.062	Sy1	2MASXJ13583078+2005515	2009ApJS..182..543A
J140517.8+174910	1245314329978856960	14 05 18.07	+17 49 14.4	3.26 ± 0.73	0.104	Sy1	LEDA1542593	2012ApJS..203...21A
J140845.5+353219	1482572824535994624	14 08 45.73	+35 32 18.6	3.60 ± 0.64	0.166	Sy2	2MASXJ14084576+3532186	2012ApJS..203...21A
J141109.3+444012	1504754165956574592	14 11 09.17	+44 40 11.9	4.29 ± 1.09	0.095	Sy1	2MASSJ14110916+4440119	2012ApJS..203...21A
J141222.9+335716	1479178151105353216	14 12 22.83	+33 57 15.5	3.36 ± 0.78	0.116	Galaxy SF	2MASXJ14122281+3357152	2012ApJS..203...21A
J141238.3+391836	1485338744822384384	14 12 38.15	+39 18 36.8	3.62 ± 0.42	0.026	Sy1	NGC5515	2012ApJS..203...21A
J141415.3+264449	1259266204821618816	14 14 15.18	+26 44 51.4	1.06 ± 0.19	0.035	Sy2	Mrk670	2012ApJS..203...21A
J141607.9+352036	1479409976257999872	14 16 07.75	+35 20 37.8	6.75 ± 1.06	0.013	Sy2	NGC5533	2018ApJ...861...49H
J141942.9+491412	1508267002527518464	14 19 43.23	+49 14 11.9	6.10 ± 0.64	0.026	AGN	Mrk1490	2012ApJS..203...21A
J142307.8+283541	1283888943091824000	14 23 07.51	+28 35 42.3	4.25 ± 0.65	0.029	Sy2	2MASXJ14230749+2835418	2015ApJS..219...12A
J142630.7+390345	1490705907750159104	14 26 30.68	+39 03 43.4	0.51 ± 0.10	0.081	Sy1	LEDA3096357	2012ApJS..203...21A
J142808.1+464203	1506647078302444800	14 28 08.10	+46 42 03.3	3.04 ± 0.39	0.074	Sy1	2MASXJ14280814+4642037	2012ApJS..203...21A
J142817.8+571015	1610593773720675584	14 28 17.99	+57 10 18.5	2.05 ± 0.21	0.043	Sy2	2MASXJ14281793+5710187	2012ApJS..203...21A
J143016.1+230345	1254429624969681664	14 30 16.04	+23 03 44.5	3.05 ± 0.58	0.081	Sy2	2MASSJ14301603+2303445	2009ApJS..182..543A
J143318.3+344404	1480032677798584960	14 33 18.48	+34 44 04.4	3.06 ± 0.65	0.034	LINER	UGC9367	2012ApJS..203...21A
J143452.5+483943	1603298647213095808	14 34 52.46	+48 39 42.7	0.68 ± 0.14	0.037	Sy1	NGC5683	2017ApJS..233...25A
J143701.5+264019	1279530852661016576	14 37 01.50	+26 40 19.2	2.08 ± 0.40	0.218	QSO	2MASSJ14370150+2640191	2012ApJS..203...21A
J143731.8+155549	1234415558406458752	14 37 31.70	+15 55 47.6	3.64 ± 0.45	0.037	Sy1	2MASXJ14373169+1555479	2015ApJS..219...12A
J143820.9+464940	1494885568060805376	14 38 21.17	+46 49 43.7	4.02 ± 1.07	0.324	AGN	SDSSJ143821.16+464943.7	2015ApJS..219...12A
J143936.3+445504	1493842028446433152	14 39 36.35	+44 55 04.3	6.03 ± 0.66	0.088	Sy1	2MASSJ14393635+4455042	2012ApJS..203...21A
J144026.2+332703	1286762448016026112	14 40 25.84	+33 27 02.6	9.41 ± 2.24	0.275	Sy1	SDSSJ144025.84+332702.5	2012ApJS..203...21A
J144214.4+291808	1282484213908548992	14 42 14.63	+29 18 08.9	3.78 ± 0.83	0.062	Galaxy SF	2MASXJ14421460+2918093	2012ApJS..203...21A

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J144227.5+555848	1607566096654997760	14 42 27.61	+55 58 46.4	4.61 ± 0.33	0.077	Galaxy SF	2MASXJ14422754+5558465	2012ApJS..203...21A
J144331.4+492335	1591767832551398400	14 43 31.26	+49 23 35.2	5.82 ± 1.34	0.030	AGN	2MASXJ14433125+4923353	2009ApJS..182..543A
J144640.4+162402	1186652842015404416	14 46 40.21	+16 24 02.2	2.31 ± 0.27	0.054	Sy1	2MASSJ14464020+1624021	2012ApJS..203...21A
J144738.9+610655	1617866390303368192	14 47 39.33	+61 06 56.0	1.37 ± 0.30	0.137	Sy1	LEDA2816925	2012ApJS..203...21A
J144819.4+443232	1490669834321127936	14 48 19.38	+44 32 32.7	4.80 ± 0.72	0.080	Sy1	LEDA2246593	2012ApJS..203...21A
J144924.5+321815	1283499819060669568	14 49 24.44	+32 18 16.2	3.29 ± 0.27	0.058	QSO	LEDA1990685	2018AJ....155..189D
J145229.7+383425	1296245735802396800	14 52 29.63	+38 34 24.7	3.76 ± 0.88	0.068	Sy1	2MASXJ14522965+3834251	2009ApJS..182..543A
J145404.9+363317	1293628417091927552	14 54 04.58	+36 33 20.5	5.20 ± 1.14	0.071	Galaxy SF	2MASXJ14540453+3633207	2012ApJS..203...21A
J145425.5+464525	1590336508929283200	14 54 25.48	+46 45 24.1	8.99 ± 0.81	0.069	Sy1	2MASXJ14542548+4645239	2012ApJS..203...21A
J145517.7+173831	1188306576223165696	14 55 17.69	+17 38 29.7	2.41 ± 0.62	0.095	Sy1	2MASSJ14551769+1738297	2012ApJS..203...21A
J150843.0+281018	127480440069294976	15 08 42.62	+28 10 16.2	3.65 ± 0.78	0.026	Galaxy SF	LEDA84441	2017AJ....154...86W
J150852.9+681407	1693563917585165440	15 08 52.81	+68 14 07.0	0.68 ± 0.13	0.058	Sy1	2MASXJ15085291+6814074	2016ApJ...818..113N
J150909.0+090222	1166949486271776640	15 09 08.76	+09 02 21.0	2.65 ± 0.36	0.044	QSO	Z77-21	2017A&A...597A..79P
J151345.7+311129	1276379519191952896	15 13 45.76	+31 11 25.1	7.37 ± 1.41	0.072	Galaxy SF	2MASXJ15134575+3111250	2012ApJS..203...21A
J151444.8+265431	1271433331777425792	15 14 44.82	+26 54 32.5	5.12 ± 0.64	0.138	Galaxy SF	SDSSJ151444.81+265432.4	2012ApJS..203...21A
J151721.7+465812	1588105221880035584	15 17 22.00	+46 58 12.9	17.63 ± 2.3	0.154	Galaxy SF	None	Current paper
J151751.7+050628	1156171390396557056	15 17 51.71	+05 06 27.8	4.22 ± 0.49	0.039	Sy1	2MASXJ15175169+0506278	2012ApJS..203...21A
J152043.3+304123	1276861929920624768	15 20 43.23	+30 41 22.6	0.65 ± 0.11	0.077	Sy1	2MASXJ15204320+3041228	2012ApJS..203...21A
J152240.1+310858	1276903470845032064	15 22 40.24	+31 08 56.7	4.32 ± 0.71	0.116	Galaxy R	FIRSTJ152240.2+310856	1998AJ....116.1529H
J152345.3+322820	1277310324506209280	15 23 45.08	+32 28 22.4	2.88 ± 0.62	0.077	Sy1	2MASXJ15234513+3228222	2000AN....321....1S
J152433.4+274311	1270990984505904640	15 24 33.35	+27 43 11.6	5.30 ± 0.52	0.069	Sy1	2MASXJ15243338+2743117	2016ApJ...832...67N
J153333.1+321813	1274488977669512192	15 33 33.16	+32 18 13.5	3.68 ± 0.74	0.065	Sy1	2MASXJ15333315+3218134	2009ApJS..182..543A
J153344.4+235815	1220979801197880448	15 33 44.60	+23 58 11.9	4.20 ± 0.41	0.067	Sy1	2MASSJ15334460+2358119	2009ApJS..182..543A

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J153937.1+591954	1602979758777666432	15 39 37.06	+59 19 55.2	4.13 ± 0.97	0.008	Sy	NGC5985	2003A&A...412...45P
J154450.1+440742	1396627982025903616	15 44 50.38	+44 07 43.6	3.60 ± 0.75	0.255	Sy1	2MASSJ15445037+4407436	2005AJ...130..367S
J154529.6+251128	1222781282277296256	15 45 29.63	+25 11 27.9	2.82 ± 0.59	0.117	Sy2	2MASXJ15452960+2511283	2012ApJS..203...21A
J155340.4+434405	1396689902570254208	15 53 40.36	+43 44 04.9	4.06 ± 0.96	0.040	LINER	2MASXJ15534030+4344046	2002AJ....124.3465S
J155640.4+451339	1396931107932865920	15 56 40.32	+45 13 38.4	3.09 ± 0.65	0.181	Sy2	SDSSJ155640.32+451338.4	2015ApJS..219...12A
J155943.9+274232	1316581065919736576	15 59 43.94	+27 42 29.7	3.04 ± 0.79	0.051	Galaxy SF	2MASXJ15594391+2742299	2020AJ....160..120J
J160508.8+323922	1323103506333569280	16 05 08.88	+32 39 21.5	1.48 ± 0.40	0.091	Sy1	LEDA2006774	2012ApJS..203...21A
J160851.4+295719	1318789194505704192	16 08 51.07	+29 57 15.0	9.98 ± 1.51	0.048	Sy2	2MASXJ16085109+2957144	2015ApJS..219...12A
J161159.6+311043	1321984993770903808	16 11 59.55	+31 10 41.5	3.23 ± 0.63	0.159	Sy1	LEDA1935181	2009ApJS..182..543A
J161318.4+361617	1330140208953474816	16 13 18.50	+36 16 21.9	7.71 ± 1.23	0.082	LINER	SDSSJ161318.51+361621.8	2012ApJS..203...21A
J161456.2+413058	1381645559845677184	16 14 56.18	+41 30 55.8	2.18 ± 0.52	0.196	Sy1	2MASXJ16145620+4130560	2012ApJS..203...21A
J161818.6+421914	1382113470762723584	16 18 18.49	+42 19 14.2	2.84 ± 0.49	0.165	Sy1	2MASSJ16181850+4219141	2012ApJS..203...21A
J161944.9+243432	1302475156369007488	16 19 44.98	+24 34 31.9	1.69 ± 0.22	0.065	Sy1	2MASSJ16194498+2434318	2012ApJS..203...21A
J162052.6+540058	1428334190814957056	16 20 52.60	+54 00 58.6	1.54 ± 0.34	0.146	Sy1	2MASSJ16205259+5400587	2015ApJS..219...12A
J162315.2+342825	1328768533838378624	16 23 15.16	+34 28 24.1	3.96 ± 1.07	0.165	Sy1	2MASSJ16231516+3428239	2009ApJS..182..543A
J162433.5+555456	1429521044897260544	16 24 33.47	+55 54 52.6	5.73 ± 0.86	0.031	Galaxy	2MASXJ16243340+5554521	1999PASP..111..438F
J162501.5+241546	1302219554275260032	16 25 01.44	+24 15 47.4	1.70 ± 0.33	0.050	Sy1	2MASSJ16250142+2415473	2012ApJS..203...21A
J162921.9+413357	1333056354308113664	16 29 21.83	+41 33 55.5	3.58 ± 0.78	0.161	Sy1	2MASSJ16292185+4133553	2012ApJS..203...21A
J162948.2+672242	1648419928654134784	16 29 48.38	+67 22 42.0	1.14 ± 0.25	0.025	Sy1	Mrk885	1992A&AS...93..211F
J163202.6+320338	1324526514898399104	16 32 02.48	+32 03 39.4	1.53 ± 0.26	0.059	Sy1	2MASXJ16320244+3203397	2015ApJS..219...12A
J163221.1+641052	1629118483063501696	16 32 20.70	+64 10 53.5	5.31 ± 0.84	0.065	Galaxy	2MASXJ16322060+6410539	1999MNRAS.308..897L
J163508.8+461248	1407114990788539264	16 35 09.19	+46 12 50.1	3.65 ± 0.92	0.031	Galaxy	IC1222	2017AJ....154...86W

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J164058.9+114405	4447290170879601280	16 40 58.89	+11 44 04.2	2.05 ± 0.32	0.078	BLL	LEDA58746	2011ApJ...741...30A
J164313.8+095416	4446025560705238656	16 43 13.78	+09 54 16.2	1.63 ± 0.17	0.047	Galaxy	2MASXJ16431379+0954163	1999PASP..111..438F
J164819.0+302211	1311567877011972608	16 48 19.02	+30 22 10.8	1.48 ± 0.34	0.102	Sy1	LEDA1901045	2009ApJS..182..543A
J164903.7+190306	4562867946970127616	16 49 03.65	+19 03 07.1	3.05 ± 0.56	0.148	Sy1	SDSSJ164903.65+190307.1	2012ApJS..203...21A
J165121.8+215530	4565704377731941632	16 51 21.88	+21 55 26.3	2.01 ± 0.45	0.055	Sy2	2MASXJ16512188+2155264	2012ApJS..203...21A
J165129.6+192502	4562898527137478656	16 51 29.52	+19 24 59.9	3.61 ± 0.93	0.023	LINER	UGC10585	2015ApJS..219...12A
J165251.5+172650	4559362016706811776	16 52 51.42	+17 26 51.0	5.68 ± 0.59	0.034	Galaxy	2MASXJ16525143+1726514	1999PASP..111..438F
J165315.4+234941	456656209980989696	16 53 15.06	+23 49 42.9	8.61 ± 1.05	0.103	Sy2	IRAS16511+2354	2017A&A...597A..79P
J165601.6+211240	4564662075066830720	16 56 01.60	+21 12 41.1	2.24 ± 0.32	0.049	Sy1	LEDA1645221	2012ApJS..203...21A
J170315.9+312725	1310317182535337216	17 03 15.72	+31 27 28.6	1.67 ± 0.42	0.034	LINER	Mrk700	1999PASP..111..438F
J170922.4-014010	4367895570106812544	17 09 22.40	-01 40 12.3	2.97 ± 0.58	0.093	Galaxy	2MASXJ17092238-0140124	2007MNRAS.375..931M
J171228.4+355301	1338381873237183488	17 12 28.43	+35 53 02.7	2.16 ± 0.48	0.026	Sy1	MCG+06-38-005	2012ApJS..203...21A
J172239.8+305253	4599787898162731008	17 22 39.93	+30 52 52.6	0.31 ± 0.07	0.043	Sy1	Mrk506	2012ApJS..203...21A
J172533.0+571646	1432893487578089984	17 25 33.08	+57 16 45.5	5.53 ± 1.16	0.066	Sy1	2MASXJ17253309+5716453	2012ApJS..203...21A
J172608.1+743104	1655725217052044800	17 26 08.26	+74 31 04.0	1.78 ± 0.42	0.052	Sy1	2MASXJ17260822+7431043	1997A&A...320..395W
J173629.5+174040	4550423468210659712	17 36 29.29	+17 40 39.6	3.68 ± 0.59	0.084	Galaxy	IRAS17342+1742	2000MNRAS.317..55S
J174514.8+705128	1639075140673511424	17 45 14.77	+70 51 26.8	2.28 ± 0.49	0.272	Sy1	None	2022AstL...48..724K
J174908.8+614030	1436218307661726976	17 49 09.10	+61 40 26.1	4.60 ± 1.17	0.039	Galaxy	2MASXJ17490910+6140262	1999PASP..111..438F
J175505.5+651954	1440858727766978048	17 55 05.61	+65 19 55.0	0.73 ± 0.15	0.079	QSO	RXJ1755.0+6519	2003ApJS..149...29G
J175610.9+475824	1363075598726822912	17 56 10.81	+47 58 24.8	2.49 ± 0.44	0.062	Sy2	None	2022AstL...48..724K
J180203.5+290622	4584373913376142208	18 02 03.65	+29 06 20.9	3.27 ± 0.58	0.022	Galaxy	2MASXJ18020367+2906209	2003A&A...412...45P
J181101.3+653323	2161443945276002176	18 11 00.99	+65 33 20.4	4.08 ± 0.51	0.050	Galaxy	2MASXJ18110093+6533203	2000ApJ...541..134X

Таблица 1. Продолжение

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J181725.1+111849	4484513209326381824	18 17 25.15	+11 18 48.0	1.50 ± 0.40	0.058	AGN	2MASXJ18172518+1118475	2003A&A...412...45P
J190050.5+284615	2040335556984894720	19 00 50.52	+28 46 16.4	4.10 ± 0.62	0.014	AGN	NGC6740	2003A&A...412...45P
J190458.6+375541	2099193273407653888	19 04 58.65	+37 55 41.0	0.70 ± 0.14	0.089	AGN	[MEB2011]KAJ1904+37	2012ApJ...751...52E
J191734.8+451337	2127253875299563136	19 17 34.83	+45 13 37.2	0.87 ± 0.22	0.078	AGN	2MASSJ19173481+4513371	2018ApJ...857..141S
J192156.1+550847	2140251786365419008	19 21 56.06	+55 08 47.1	3.30 ± 0.31	0.092	Sy2	None	2022AstL...48..724K
J192852.3-251642	6766602609845906176	19 28 52.31	-25 16 38.7	5.20 ± 0.55	0.108	Galaxy	2MASXJ19285232-2516388	2009MNRAS...399..683J
J193203.8+410244	2053551343150878336	19 32 04.02	+41 02 43.4	0.94 ± 0.20	0.083	Sy1	2MASSJ19320402+4102433	2022AstL...48..724K
J195456.5-062851	4196937111313151744	19 54 56.43	-06 28 53.4	3.01 ± 0.28	0.029	Galaxy	2MASXJ19545644-0628535	2003A&A...412...45P
J200751.1-110834	6880901928797242112	20 07 51.30	-11 08 34.3	1.03 ± 0.25	0.031	Sy2	2MASXJ20075129-1108346	2009MNRAS...399..683J
J202035.2+561501	2187638091826468352	20 20 35.21	+56 14 59.6	4.47 ± 0.51	0.034	Galaxy	2MASXJ20203523+5614596	2015AJ...149..171T
J203505.6+260330	1855872415343918080	20 35 05.65	+26 03 29.9	0.70 ± 0.12	0.050	Sy1	2MASSJ20350565+2603300	2014A&A...561A..67P
J205812.4+300437	1858495678286706048	20 58 12.35	+30 04 37.2	0.82 ± 0.10	0.033	Sy1	LEDA140941	2011MNRAS...416.2840L
J210221.6+105816	1756655887651319680	21 02 21.64	+10 58 16.0	2.39 ± 0.26	0.029	Sy1	2MASXJ21022164+1058159	2003A&A...412...45P
J210317.7-343236	6780324995955666304	21 03 17.88	-34 32 33.8	4.82 ± 0.82	0.071	Galaxy	FRL1170	1988MNRAS...233..691F
J212400.3+340913	1855138731842796032	21 24 00.31	+34 09 11.6	0.97 ± 0.22	0.083	Sy1	2MASXJ21240027+3409114	2014A&A...561A..67P
J212404.9-164149	6835161283006507520	21 24 04.81	-16 41 48.1	7.01 ± 1.09	0.036	Galaxy SF	2MASXJ21240483-1641484	2009MNRAS...399..683J
J213833.4+320505	1946765262028434944	21 38 33.43	+32 05 05.8	0.33 ± 0.07	0.025	Sy1	Z493-2	2011MNRAS...416.2840L
J214904.0-014111	2673969917489449088	21 49 03.97	-01 41 11.8	1.44 ± 0.26	0.053	QSO	6dFGSgJ214904.0-014112	2009MNRAS...399..683J
J220509.5-004820	2677231034617635712	22 05 09.51	-00 48 20.5	4.16 ± 0.88	0.098	Sy1	2E2202.5-0103	2012ApJS...203...21A
J222407.8+040912	2707307934677176960	22 24 07.82	+04 09 12.9	1.43 ± 0.37	0.098	AGN	2MASXJ22240782+0409124	2017ApJS...233...25A
J222719.3+400549	1909278375151739264	22 27 19.04	+40 05 50.3	0.64 ± 0.11	0.068	QSO	2MASSJ22271903+4005502	2012ApJS...199...26H
J223546.4-260302	6621415775889322880	22 35 46.20	-26 03 01.6	1.40 ± 0.22	0.005	Sy1	NGC7314	2004MNRAS...350.1195M

Таблица 1. Окончание

SRGe+	GAIA EDR3+	RA	DEC	μ (mas/yr)	z	Type	Simbad	Reference
J223655.9–221316	6627822939381980032	22 36 55.95	–22 13 15.0	0.58 ± 0.11	0.033	Sy1	ESO602–31	2009MNRAS.399..683J
J223715.4+402943	1932429657626173184	22 37 15.51	+40 29 45.0	1.60 ± 0.23	0.058	AGN cand.	LEDA5060459	2012ApJS..199...26H
J224017.2+080315	2715798363466995328	22 40 17.06	+08 03 13.5	0.68 ± 0.13	0.025	Sy1	UGC12138	2018ApJ...861...49H
J224156.0+201543	2834561493466339456	22 41 55.96	+20 15 41.4	1.58 ± 0.35	0.024	Sy	Mrk308	2018ApJ...861...49H
J224311.1+032804	2704625950939055488	22 43 11.02	+03 28 04.8	0.84 ± 0.14	0.039	Galaxy	2MASXJ22431105+0328050	2012ApJS..199...26H
J230812.1–281752	2379049803356498688	23 08 11.89	–28 17 52.9	2.84 ± 0.44	0.119	Galaxy	2dFGRSTGS187Z129	2001MNRAS.328.1039C
J231119.5–265509	2379295853443238400	23 11 19.32	–26 55 08.4	2.40 ± 0.56	0.055	Galaxy	6dFGSgJ231119.3–265509	1998MNRAS.300..417R
J231348.2+234918	2839452945822184960	23 13 48.31	+23 49 14.0	1.69 ± 0.45	0.021	Galaxy	Mrk317	2003A&A...412...45P
J232009.8–293131	2329940253940761216	23 20 09.77	–29 31 30.0	0.56 ± 0.11	0.052	AGN cand.	LEDA133524	1998MNRAS.300..417R
J232804.7+183153	2824026179208248064	23 28 04.84	+18 31 53.2	0.82 ± 0.20	0.023	Galaxy	MCG+03–59–058	2018ApJ...861...49H
J232910.3+472800	1941757330160593536	23 29 10.44	+47 28 01.3	3.30 ± 0.55	0.040	Sy1	None	2022AstL...48..724K
J233109.8–295746	2329256117190225152	23 31 09.79	–29 57 44.9	1.04 ± 0.35	0.053	Galaxy	2MASXJ23310975–2957452	1998MNRAS.300..417R
J233515.6–085729	2438794099819112960	23 35 16.07	–08 57 23.5	5.23 ± 1.04	0.086	Galaxy	2MASXJ23351606–0857234	2012ApJS..203...21A
J233523.0+450054	1937302143405657600	23 35 22.95	+45 00 54.5	0.58 ± 0.15	0.074	Galaxy	2MASXJ23352293+4500548	2000MNRAS.317...55S
J233604.7–313450	2325865085891363200	23 36 04.96	–31 34 51.0	3.45 ± 0.75	0.062	Galaxy R	PKS2333–318	2007MNRAS.375..931M
J233714.5–122123	2432491596089026688	23 37 14.39	–12 21 21.9	2.12 ± 0.49	0.101	Galaxy	6dFGSgJ233714.4–122122	1999MNRAS.308..897L
J234726.2+505850	1944173403888702592	23 47 26.32	+50 58 50.4	5.07 ± 0.83	0.062	Sy1	None	2022AstL...48..724K
J234758.5–151241	2418934690733525760	23 47 58.50	–15 12 41.9	2.48 ± 0.60	0.083	AGN	2MASXJ23475845–1512421	2007MNRAS.375..931M
J235330.8+115256	2766655895853793664	23 53 30.74	+11 52 52.5	4.64 ± 0.68	0.235	QSO	SDSSJ235330.74+115252.4	2020ApJS..250....8L
J235601.9+073123	2746340185147938304	23 56 01.95	+07 31 23.3	2.13 ± 0.35	0.040	Sy1	Mrk541	2018ApJ...861...49H
J235959.2+083354	2747061739653312768	23 59 59.30	+08 33 54.0	0.62 ± 0.09	0.083	Sy1	LEDA1349333	2000AJ....119.2540G

* Спектроскопические наблюдения проводились на РТТ–150, 2022AstL...48..724K.

Таблица 2. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — Сейфертовские галактики 1-го типа

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
11 05 04.21	+50 59 49.9	19.86	9.43	−0.3	4.9	3.3	0.118	5.2
14 40 25.84	+33 27 02.6	20.82	9.41	−0.7	2.7	3.4	0.275	13.5
14 54 25.48	+46 45 24.1	18.99	8.99	0.1	5.2	5.7	0.069	3.3
13 56 20.70	+26 43 54.4	19.66	8.86	0.3	24.2	3.7	0.062	1.3
11 02 41.47	+42 06 51.9	19.35	7.02	−0.2	3.1	2.8	0.075	2.1
13 31 06.88	+51 09 30.9	20.15	6.85	−0.1	1.8	9.3	0.179	5.5
00 44 47.34	+15 29 11.9	20.22	6.51	−0.4	5.2	7.6	0.227	8.4
14 39 36.35	+44 55 04.3	19.29	6.03	0.1	5.2	8.4	0.088	2.6
17 25 33.08	+57 16 45.5	19.40	5.53	−0.5	5.3	1.1	0.066	1.2
15 24 33.35	+27 43 11.6	18.82	5.30	−0.6	2.4	1.4	0.069	1.8
23 47 26.32	+50 58 50.4	19.53	5.07	−0.1	10.8	1.7	0.062	0.7
14 48 19.38	+44 32 32.7	19.30	4.80	0.4	1.4	11.4	0.080	1.3
12 35 53.51	+42 41 21.0	20.09	4.44	−0.5	0.0	2.9	0.155	2.4
12 42 36.10	+78 07 20.4	18.24	4.30	0.1	2.9	1.1	0.022	0.2
14 11 09.17	+44 40 11.9	20.02	4.29	−0.6	3.7	0.9	0.095	0.9
15 17 51.71	+05 06 27.8	17.93	4.22	−0.1	3.6	3.3	0.039	1.0
15 33 44.60	+23 58 11.9	19.28	4.20	−0.8	9.1	0.6	0.067	0.9
22 05 09.51	−00 48 20.5	19.30	4.16	0.1	14.6	9.0	0.098	1.7
12 37 40.72	+61 11 48.6	19.79	4.10	−0.6	5.6	5.0	0.181	4.7
16 23 15.16	+34 28 24.1	19.99	3.96	−0.0	1.3	11.1	0.165	2.5
10 17 38.72	+42 01 03.3	18.91	3.94	−0.9	5.2	1.7	0.107	3.0
14 52 29.63	+38 34 24.7	19.44	3.76	−0.3	12.5	1.5	0.068	0.6
15 33 33.16	+32 18 13.5	19.66	3.68	0.2	15.9	3.7	0.065	0.5
02 12 57.60	+14 06 10.2	18.24	3.66	−0.1	5.3	6.7	0.062	1.7
14 37 31.70	+15 55 47.6	18.21	3.64	−1.0	16.9	0.3	0.037	0.5
14 12 38.15	+39 18 36.8	17.95	3.62	−0.6	1.9	0.4	0.026	0.3
15 44 50.38	+44 07 43.6	19.99	3.60	−0.7	3.3	7.2	0.255	7.3
16 29 21.83	+41 33 55.5	19.88	3.58	−0.2	9.1	8.5	0.161	2.7
07 25 28.48	+43 43 32.3	19.53	3.52	−0.4	4.6	1.3	0.069	0.6
11 17 05.21	+47 02 14.3	19.61	3.38	−0.3	6.1	11.3	0.188	4.2
11 39 25.56	+45 13 46.7	19.12	3.38	−0.5	11.0	5.5	0.127	3.2
23 29 10.44	+47 28 01.3	18.55	3.30	−1.2	2.3	0.1	0.040	0.4
00 28 48.78	+14 52 16.3	19.67	3.29	0.2	3.8	6.3	0.089	0.7
14 05 18.07	+17 49 14.4	19.27	3.26	−1.2	3.2	0.5	0.104	1.5
12 44 41.48	+37 40 25.1	19.72	3.24	−0.2	15.2	10.7	0.166	3.0

Таблица 2. Продолжение

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
16 11 59.55	+31 10 41.5	19.65	3.23	0.0	4.0	17.0	0.159	3.0
13 14 47.07	+26 06 24.1	18.22	3.21	0.0	8.2	10.5	0.072	1.9
13 07 02.89	+56 31 58.4	18.86	3.09	-0.6	11.0	1.8	0.081	1.2
16 49 03.65	+19 03 07.1	19.51	3.05	-0.7	7.0	2.8	0.148	2.4
14 28 08.10	+46 42 03.3	19.28	3.04	0.1	11.6	5.3	0.074	0.7
12 06 55.63	+50 17 37.2	18.70	3.03	0.0	1.6	5.0	0.061	0.8
13 42 20.15	+38 42 09.7	19.06	3.02	0.3	3.1	11.4	0.079	0.9
15 23 45.08	+32 28 22.4	19.46	2.88	-1.3	0.0	0.2	0.077	0.7
13 44 48.63	+30 44 20.4	18.44	2.86	-0.4	28.0	4.3	0.077	1.7
13 58 30.78	+20 05 51.2	18.86	2.84	-1.3	2.4	0.2	0.062	0.7
16 18 18.49	+42 19 14.2	19.06	2.84	-0.5	12.1	9.9	0.165	4.8
02 10 49.38	+24 07 06.7	19.34	2.71	-1.0	4.3	1.6	0.144	2.3
10 11 48.35	+50 50 00.5	19.22	2.62	-0.3	15.7	2.7	0.079	0.7
03 20 06.32	+40 21 58.7	18.85	2.55	-0.3	18.2	1.3	0.047	0.3
14 55 17.69	+17 38 29.7	18.72	2.41	-0.3	2.6	5.9	0.095	1.5
21 02 21.64	+10 58 16.0	17.78	2.39	-0.1	14.9	1.9	0.029	0.3
14 46 40.21	+16 24 02.2	17.90	2.31	-0.8	2.4	1.2	0.054	0.9
17 45 14.77	+70 51 26.8	19.42	2.28	-0.5	1.7	18.5	0.272	7.0
16 56 01.60	+21 12 41.1	18.80	2.24	-0.0	1.4	2.7	0.049	0.3
16 14 56.18	+41 30 55.8	19.28	2.18	-1.0	2.6	3.2	0.196	3.6
17 12 28.43	+35 53 02.7	18.81	2.16	-1.2	2.4	0.04	0.026	0.08
23 56 01.95	+07 31 23.3	17.94	2.13	-1.1	7.8	0.3	0.040	0.4
11 23 48.04	+46 56 50.1	19.44	2.08	-0.2	2.5	12.3	0.157	2.1
12 17 45.79	+53 49 02.4	19.71	2.02	-0.4	4.3	9.0	0.194	2.4
04 05 51.36	+81 37 17.2	19.25	1.97	-0.4	6.5	4.6	0.118	1.2
13 38 26.87	+32 12 52.7	19.36	1.95	0.2	1.6	8.8	0.089	0.6
07 40 08.90	+80 03 57.1	18.73	1.91	0.1	2.9	11.4	0.087	0.9
17 26 08.26	+74 31 04.0	18.18	1.78	-0.5	2.2	2.0	0.052	0.6
02 04 36.76	-11 59 43.4	17.98	1.76	-0.4	5.3	5.8	0.073	1.3
16 25 01.44	+24 15 47.4	18.41	1.70	-0.6	25.6	1.1	0.050	0.4
16 19 44.98	+24 34 31.9	18.52	1.69	-0.0	7.4	6.4	0.065	0.6
12 44 12.06	+50 42 02.0	19.22	1.67	-0.2	14.7	28.5	0.216	3.8
09 21 08.59	+44 54 50.8	19.44	1.66	-0.0	16.2	18.0	0.156	1.5
09 04 36.95	+55 36 02.7	17.57	1.57	0.2	4.9	7.8	0.037	0.4
11 06 47.46	+72 34 07.3	15.36	1.57	-0.4	7.9	0.9	0.009	0.2
16 20 52.60	+54 00 58.6	18.69	1.54	-0.4	2.7	13.5	0.146	2.6

Таблица 2. Окончание

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
16 32 02.48	+32 03 39.4	18.80	1.53	−0.9	3.4	0.6	0.059	0.3
16 48 19.02	+30 22 10.8	18.30	1.48	−0.7	4.2	4.1	0.102	1.5
16 05 08.88	+32 39 21.5	18.82	1.48	−0.4	18.2	3.6	0.091	0.7
10 50 57.29	+59 32 14.5	18.40	1.41	−0.1	3.0	11.0	0.085	1.0
11 44 33.06	+61 32 00.7	18.56	1.41	−1.0	5.6	0.3	0.048	0.2
22 35 46.20	−26 03 01.6	17.72	1.40	0.4	1.8	0.2	0.005	0.005
14 47 39.33	+61 06 56.0	18.43	1.37	−1.1	3.5	2.6	0.137	2.3
10 22 33.70	+58 27 04.9	18.99	1.33	−0.1	5.0	4.7	0.077	0.4
11 29 57.95	+46 20 59.5	19.34	1.29	−0.3	12.1	21.2	0.210	2.7
12 31 52.05	+45 04 43.1	18.18	1.29	−0.4	5.3	3.3	0.062	0.5
13 03 01.05	+40 38 40.6	18.45	1.23	−0.6	11.7	1.8	0.067	0.4
11 09 19.75	+71 42 33.4	18.26	1.20	−0.3	2.2	19.8	0.130	2.3
05 35 32.13	+40 11 15.8	17.88	1.15	0.2	2.0	1.6	0.021	0.06
16 29 48.38	+67 22 42.0	17.90	1.14	−0.0	5.8	1.5	0.025	0.08
11 49 58.09	+57 51 07.7	18.72	1.06	−0.2	3.0	8.3	0.100	0.7
21 24 00.31	+34 09 11.6	18.82	0.97	0.0	5.7	9.3	0.083	0.4
19 32 04.02	+41 02 43.4	18.52	0.94	−0.2	2.1	7.1	0.083	0.5
13 10 56.19	+44 44 13.6	18.54	0.92	−0.4	24.7	2.1	0.060	0.2
13 49 15.20	+22 00 32.6	17.77	0.86	−0.7	2.9	2.1	0.062	0.4
12 34 29.86	+62 18 06.2	18.47	0.84	−0.3	1.5	15.8	0.135	1.3
20 58 12.35	+30 04 37.2	16.96	0.82	−0.2	1.3	4.1	0.033	0.3
12 46 12.11	+41 08 11.9	17.75	0.73	−0.3	2.8	6.5	0.067	0.5
20 35 05.65	+26 03 29.9	17.51	0.70	−0.0	3.2	8.9	0.050	0.3
22 40 17.06	+08 03 13.5	16.22	0.68	−0.4	2.6	2.8	0.025	0.2
15 08 52.81	+68 14 07.0	16.95	0.68	−0.1	2.2	17.3	0.058	0.7
14 34 52.46	+48 39 42.7	18.03	0.68	−0.3	8.0	1.6	0.037	0.1
12 16 07.10	+50 49 30.1	17.36	0.67	−0.1	5.2	3.4	0.031	0.1
15 20 43.23	+30 41 22.6	18.06	0.65	−0.1	5.1	12.2	0.077	0.5
23 59 59.30	+08 33 54.0	17.40	0.62	−0.0	2.1	30.2	0.083	0.9
13 20 24.61	+69 00 11.6	17.74	0.61	−0.1	1.5	10.7	0.067	0.4
22 36 55.95	−22 13 15.0	16.88	0.58	−0.2	5.7	4.6	0.033	0.2
14 26 30.68	+39 03 43.4	17.15	0.51	−0.2	2.0	22.6	0.081	0.9
21 38 33.43	+32 05 05.8	16.05	0.33	−0.2	2.4	5.1	0.025	0.1
13 42 08.38	+35 39 15.5	16.27	0.32	−1.3	8.1	0.006	0.003	0.002
17 22 39.93	+30 52 52.6	16.75	0.31	0.0	4.6	15.4	0.043	0.2

Таблица 3. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — Сейфертовские галактики 2-го типа

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
16 08 51.07	+29 57 15.0	19.91	9.98	−0.9	0.0	0.1	0.048	0.8
16 53 15.06	+23 49 42.9	19.58	8.61	−1.1	0.0	0.6	0.103	4.7
14 16 07.75	+35 20 37.8	17.99	6.75	−1.4	4.7	0.02	0.013	0.2
12 46 17.34	+28 20 33.9	19.13	5.35	−0.6	5.9	2.4	0.100	3.1
13 15 17.26	+44 24 25.5	18.71	5.33	−0.8	6.1	0.2	0.035	0.5
06 52 36.99	+45 46 50.2	18.08	4.90	−1.5	2.6	0.03	0.021	0.3
14 23 07.51	+28 35 42.3	18.21	4.25	−0.9	3.7	0.2	0.029	0.4
14 08 45.73	+35 32 18.6	19.27	3.60	−1.3	0.0	1.3	0.166	5.1
12 16 51.77	+37 54 38.1	18.44	3.50	−0.0	3.1	6.3	0.063	1.2
03 25 12.95	+40 41 52.8	18.85	3.45	−0.4	2.4	1.1	0.047	0.5
10 16 53.65	+73 24 02.7	17.72	3.44	−0.1	1.3	0.2	0.009	0.05
01 08 11.86	+85 41 50.7	19.39	3.35	−0.4	7.4	1.6	0.077	0.8
13 48 34.95	+26 31 09.9	17.95	3.31	0.0	1.8	9.7	0.059	1.8
19 21 56.06	+55 08 47.1	18.36	3.30	−0.9	1.2	2.2	0.092	3.1
15 56 40.32	+45 13 38.4	19.75	3.09	−0.4	1.9	7.9	0.181	3.3
14 30 16.04	+23 03 44.5	19.09	3.05	0.5	9.6	20.8	0.081	1.1
15 45 29.63	+25 11 27.9	19.13	2.82	−0.1	7.0	9.9	0.117	1.9
17 56 10.81	+47 58 24.8	18.67	2.49	−1.1	1.5	0.4	0.062	0.6
13 28 11.58	+62 27 43.0	19.25	2.33	−0.6	2.5	1.8	0.091	0.9
13 04 22.19	+36 15 43.2	17.80	2.31	−1.6	0.0	0.1	0.045	0.7
13 38 04.30	+39 41 10.1	19.24	2.16	−0.3	33.5	1.5	0.060	0.3
14 28 17.99	+57 10 18.5	17.83	2.05	−1.1	1.4	0.4	0.043	0.5
13 31 47.08	+59 10 47.2	17.70	2.01	−0.2	7.2	3.9	0.043	0.6
16 51 21.88	+21 55 26.3	18.52	2.01	−1.5	0.0	0.2	0.055	0.5
13 53 17.80	+33 29 27.0	18.00	2.01	−1.5	2.3	0.004	0.008	0.01
00 03 10.02	+04 44 56.2	18.15	1.94	−1.3	2.8	0.4	0.058	0.8
02 44 43.31	+20 41 38.6	18.68	1.79	−0.4	29.6	1.2	0.051	0.3
01 25 31.46	+32 08 10.5	17.23	1.62	0.3	4.2	2.6	0.016	0.1
13 54 19.95	+32 55 47.7	18.14	1.50	−0.2	2.1	0.9	0.026	0.1
10 41 19.22	+57 45 00.1	17.51	1.13	−1.8	0.0	0.3	0.068	1.0
14 14 15.18	+26 44 51.4	16.69	1.06	−1.7	5.6	0.2	0.035	0.5
20 07 51.30	−11 08 34.3	17.96	1.03	−0.2	8.3	1.4	0.031	0.1

Таблица 4. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — АЯГ неопределенного типа

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
14 19 43.23	+49 14 11.9	17.35	6.10	−1.8	2.4	0.04	0.026	1.0
14 43 31.26	+49 23 35.2	18.93	5.82	−0.2	5.7	0.6	0.030	0.4
00 11 24.46	+38 09 33.7	19.92	5.72	−0.4	4.4	3.8	0.137	3.5
06 23 29.08	+69 12 32.6	19.93	4.54	−0.6	2.9	0.3	0.055	0.4
05 38 23.46	+79 35 12.7	17.53	4.27	−2.1	0.0	0.007	0.015	0.2
15 39 37.06	+59 19 55.2	19.26	4.13	−0.8	1.6	0.009	0.008	0.01
01 20 48.01	−08 29 18.4	18.69	4.10	−0.5	2.6	0.5	0.034	0.3
19 00 50.52	+28 46 16.4	18.95	4.10	−0.4	9.3	0.08	0.014	0.05
14 38 21.17	+46 49 43.7	20.37	4.02	−0.9	0.0	5.0	0.324	9.1
04 41 11.00	+68 37 29.3	19.78	3.87	−0.1	2.0	6.0	0.120	1.7
08 04 35.51	+50 42 30.7	19.28	3.71	−1.1	0.0	0.03	0.023	0.07
01 10 14.06	+50 10 31.0	18.96	2.81	−0.2	1.4	0.4	0.024	0.09
23 47 58.50	−15 12 41.9	18.78	2.48	−0.2	5.7	5.2	0.083	1.1
13 43 52.89	+80 35 49.4	18.67	2.46	−0.0	1.8	2.5	0.045	0.3
13 20 37.89	+34 11 26.2	18.88	2.44	−0.7	6.7	0.9	0.064	0.6
06 31 47.43	+65 54 42.5	19.36	1.97	−0.7	5.1	1.6	0.108	0.8
09 50 33.15	+44 18 51.6	17.89	1.76	−0.5	1.4	0.2	0.016	0.06
22 37 15.51	+40 29 45.0	18.43	1.60	0.3	2.8	10.4	0.058	0.4
22 41 55.96	+20 15 41.4	16.75	1.58	−2.1	0.0	0.03	0.024	0.3
18 17 25.15	+11 18 48.0	18.32	1.50	−0.0	2.6	5.8	0.058	0.4
22 24 07.82	+04 09 12.9	18.28	1.43	0.3	3.4	38.2	0.098	1.4
10 59 46.68	+45 54 09.7	19.16	1.39	−0.4	9.3	12.0	0.179	2.1
19 17 34.83	+45 13 37.2	17.40	0.87	−0.7	2.5	5.8	0.078	1.2
19 04 58.65	+37 55 41.0	17.37	0.70	−0.7	2.2	7.7	0.089	1.3
23 20 09.77	−29 31 30.0	16.96	0.56	−0.3	2.2	9.2	0.052	0.5

Таблицы с рентгеновскими характеристиками состоят из девяти столбцов: 1) RA (J2000.0); 2) DEC (J2000.0); 3) звездная величина в полосе G (Gaia eDR3); 4) модуль собственного движения в единицах mas; 5) логарифм отношения рентгеновского потока F_X по данным eРОЗИТА в диапазоне 0.3–2.3 кэВ к оптическому потоку F_{opt} в полосе G по данным Gaia eDR3; 6) X_v рентгеновская переменность, определенная как отношение между максимальным и минимальным значениями потока в четырех обзорах eРОЗИТЫ без учета ошибки измерения потока; 7) рентгеновская светимость

по данным eРОЗИТЫ в диапазоне 0.3–2.3 кэВ в собственной системе отсчета без поправки на внутренние поглощения и поглощение в Галактике¹; 8) красное смещение; 9) нижняя оценка наибольшей оптической светимости транзиентного источника, приходящегося на интервал каталога Gaia (см. Приложение).

¹Для расчета предполагалась стандартная космологическая модель Λ CDM со следующими параметрами: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70$ км/с/Мпк.

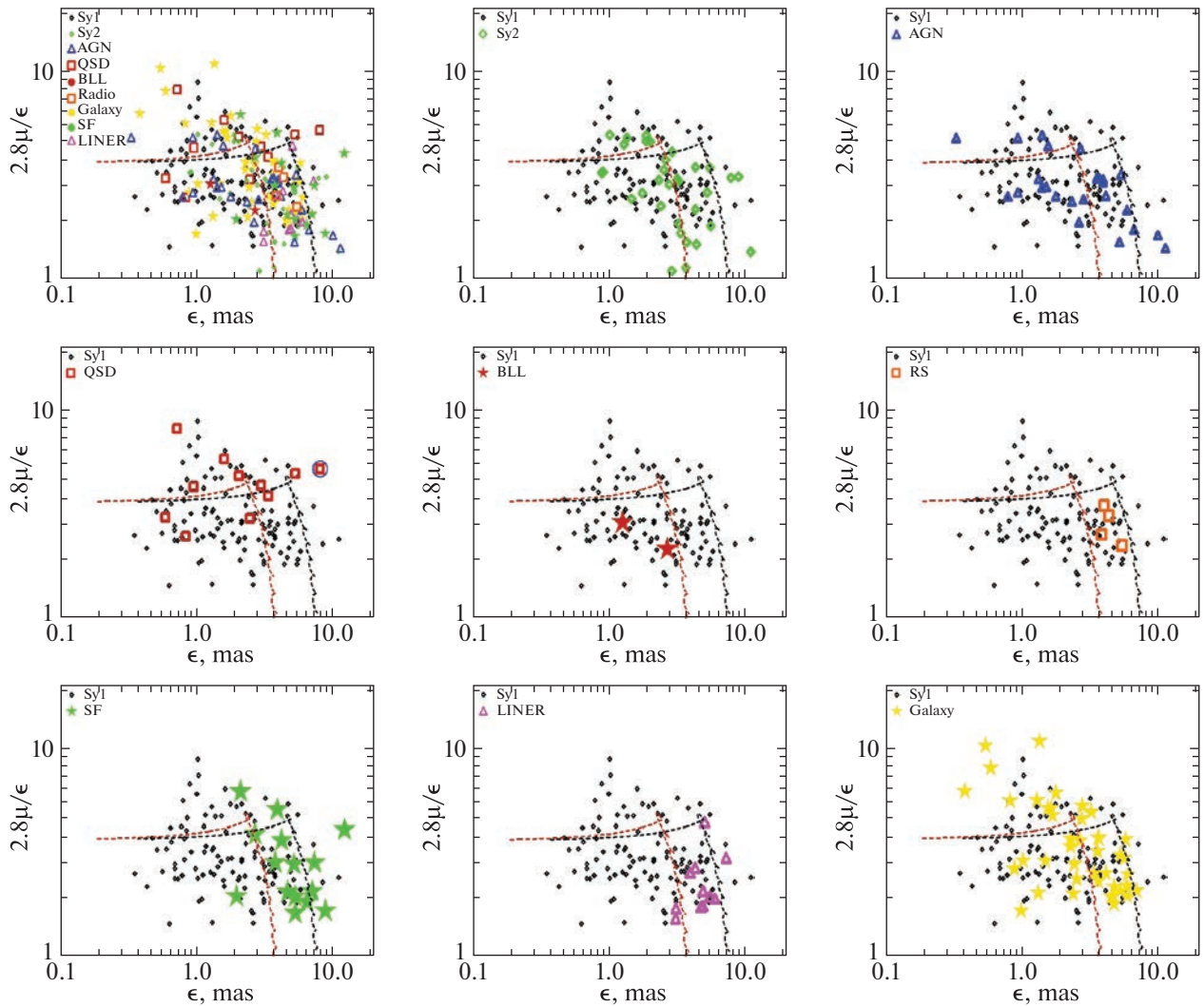


Рис. 1. Распределение по типу источника в плоскости $2.8\mu/\epsilon - \epsilon$.

ТРАНЗИЕНТНЫЕ СОБЫТИЯ КАК ИСТОЧНИКИ ИМИТАЦИИ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ В АЯГ

Если в элемент разрешения Gaia (60 mas) наряду с изображением АЯГ попадает сравнимый по потоку с оптическим излучением АЯГ транзитный источник, то подобная система, вследствие заметного изменения блеска транзита, может привести к смещению регистрируемого Gaia фотоцентра и, следовательно, к ложному сигналу собственного движения АЯГ. Таким образом, в проекцию на картинную плоскость в радиусе 60 mas от видимого центра АЯГ может попасть дополнительный источник, расположенный внутри родительской галактики даже на значительных расстояниях от активного ядра. Скорее всего такой источник будет расположен на переднем плане из-за сильного поглощения в области активного ядра.

На рис. 1 показано распределение АЯГ из каталога в зависимости от типа объекта в плоскости астрометрический шум (ϵ , astrometric_excess_noise) и отношения полного смещения источника к астрометрическому шуму ($2.8\mu/\epsilon$) по данным Gaia. Параметр астрометрического шума в Gaia определяется невязкой между координатами источника при глобальных измерениях 5-параметрической модели и фотоцентром, измеренным непосредственно по отдельным наблюдениям как центр тяжести. Для близких галактик ($z < 0.3$) невязки подвержены влиянию асимметричной структуры галактической составляющей из-за трассирования окон детекторов Gaia под разными углами. Важно, что источники нашего каталога не показывают ложного сигнала временной зависимости положения, связанной с углом сканирования (Холл и др., 2023). Кроме того, исследования смещения

Таблица 5. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — АЯГ типа LINER

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
09 11 18.96	+46 23 07.2	19.43	7.93	−0.3	8.1	3.8	0.103	4.4
16 13 18.50	+36 16 21.9	19.80	7.71	−1.2	2.4	0.2	0.082	1.7
09 05 54.50	+47 10 45.5	18.74	4.08	−1.0	3.2	0.08	0.027	0.2
15 53 40.36	+43 44 04.9	19.25	4.06	−0.2	2.4	0.8	0.040	0.3
12 02 15.46	+44 03 19.7	19.65	3.80	−0.1	8.9	4.3	0.101	1.2
16 51 29.52	+19 24 59.9	18.30	3.61	−0.8	3.7	0.1	0.023	0.2
12 10 49.61	+39 28 22.1	18.32	3.54	−0.4	24.8	0.4	0.022	0.2
14 33 18.48	+34 44 04.4	18.93	3.06	−0.5	1.9	0.3	0.034	0.2
13 43 30.01	+51 02 04.1	19.70	2.93	0.3	4.1	17.7	0.131	1.4
11 22 17.90	+59 04 28.3	17.74	1.88	−0.9	10.2	0.008	0.005	0.006
17 03 15.72	+31 27 28.6	17.04	1.67	−1.6	1.7	0.2	0.034	0.6

Таблица 6. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — квазары

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
13 11 18.54	+46 35 02.3	19.45	14.94	−0.3	2.4	28.4	0.271	130.3
01 44 17.27	+31 40 03.3	20.09	9.32	−0.2	6.6	3.5	0.124	4.2
23 53 30.74	+11 52 52.5	20.06	4.64	0.1	2.2	29.8	0.235	6.6
00 50 55.69	+29 33 28.1	19.63	4.56	−0.5	5.8	3.3	0.136	2.8
01 34 35.91	+02 28 39.9	19.32	3.51	−0.2	8.6	15.5	0.177	4.8
14 49 24.44	+32 18 16.2	18.37	3.29	−0.3	5.9	2.6	0.058	1.0
15 09 08.76	+09 02 21.0	18.31	2.65	−1.5	0.0	0.1	0.044	0.6
14 37 01.50	+26 40 19.2	19.06	2.08	0.0	3.1	56.3	0.218	6.0
21 49 03.97	−01 41 11.8	18.24	1.44	0.0	3.3	5.7	0.053	0.4
17 55 05.61	+65 19 55.0	17.32	0.73	−0.1	2.1	21.2	0.079	0.9
22 27 19.04	+40 05 50.3	17.42	0.64	−1.0	6.4	2.0	0.068	0.6

в положениях VLBI к фотоцентрам Gaia у АЯГ показали, что в 73% случаев значительных смещений было совпадение с направлением радиоджета. Это указывает на то, что хозяйская галактика не играет важной роли в обнаруженных смещениях и, следовательно, говорит в пользу симметричного распределения оптической яркости в около ядерной области (Плавин и др., 2019). Очевидно, что невязки, связанные с транзиентным событием, будут иметь место в направлении фотоцентра источника в отсутствие транзиента к положению последнего. Таким образом, для случаев близких и ярких АЯГ каталога уровень астрометрического шума, не обусловленного VIM-эффектом от транзиентного события, может быть оценен по данным Gaia по поперечным отклонениям фотоцентра относительно вектора собственного движения. Пунктирные линии соответствуют результатам оценочного моделирования (μ, ϵ) для случая, когда профиль транзиента соответствует быстрому нарастанию блеска и экспоненциальному затуханию (FRED), произошедшим на разных видимых расстояниях транзиента от ядра (X_T): черная линия — 60 mas, красная линия — 30 mas (см. Приложение). Распределения построены для случая отношения пикового потока транзиента к потоку от ядра $R_0 = 1$, параметр быстрого подъема $\sigma = 10^d$ и коэффициенту затухания $\alpha = 111^d$, которое соответствует распаду Co^{+56} , характерному для вспышек сверхновых.

Рассматриваемая подгонка наблюдаемых параметров (μ, ϵ) FRED-вспышкой является многопараметрической задачей, которая также зависит от скважности наблюдений источников в Gaia. Привлечение оптических кривых блеска Gaia источников из каталога АЯГ со значительными собственными движениями позволит получить параметры модели. Кроме того, в предложенной модели не рассматривается спектральное распределение энергии (SED) вспышек и его эволюции со временем. Необходимость включения в анализ SED становится важной в зависимости от красного смещения, так как на полосу пропускания детекторов Gaia с увеличением расстояния до объекта приходятся все более коротковолновые части электромагнитного излучения вспышек. Для детального моделирования с привлечением SED необходима полная информация об источнике за весь период наблюдений каталога Gaia eDR3 (фотометрические данные изменения блеска и позиционные данные). Однако уже сейчас можно сделать ряд качественных выводов:

1. В кривых блеска Gaia, в случаях когда максимум вспышки Сверхновой имел место внутри интервала каталога, должно наблюдаться резкое и кратковременное изменение

блеска, выброс. Причем положение транзиента по отношению к ядру соответствует направлению вектора собственного движения. А в случаях, когда наблюдения проводились на затухающей ветви вспышки, медленное падение блеска может быть воспринято как внутренняя переменность ядра. При этом положение транзиента противоположно направлению вектора собственного движения с медленным уменьшением по модулю в отличие от влияния внутренней переменности структуры ядра, которые Gaia не регистрирует. Таким образом, можно ограничить временные области расположения момента максимума вспышки — до и во время каталога Gaia, т.е. горизонтальные или вертикальные решения данной модели.

2. С добавлением новых астрометрических данных может измеряться изменение знака видимого собственного движения АЯГ на противоположный при регистрации максимума вспышки внутри каталога Gaia eDR3. Изменение знака будет иметь место в последующий период наблюдений Gaia, когда наблюдается только затухающая ветвь вспышки.
3. В галактиках с интенсивным звездообразованием, LINER и радиогалактиках транзиентный источник в модели с $R_0 = 1$ наблюдается на расстояниях не менее 30 mas. Для моделей с $R_0 < 1.0$, либо $\alpha < 111^d$ данный нижний предел еще выше. Такое ограничение, с одной стороны, объясняется сильным поглощением пыли в близкой к ядру области в галактиках со звездообразованием и LINER, но, с другой стороны, это косвенное указание на то, что области с высокоэнергичным транзиентным событием должны быть тесно связаны с активностью ядра.
4. В работе Пирс и др. (2023) показано, что взаимодействие галактик является доминирующим механизмом запуска квазарной активности в местной Вселенной. Показано, что хозяйские галактики с квазарами второго типа в ~66% демонстрируют морфологические особенности, соответствующие слияниям либо столкновениям галактик. В отличие от идеи, что квазары запускаются на пиках слияния галактик, когда два ядра объединяются, и становятся видимыми только после полного слияния, большинство морфологически возмущенных квазаров второго типа в выборке из работы Пирс и др.

Таблица 7. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — блазары

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
16 40 58.89	+11 44 04.2	18.00	2.05	−0.4	1.6	6.0	0.078	1.6
07 52 44.21	+45 56 57.4	18.17	1.29	−0.1	2.1	4.6	0.052	0.4

Таблица 8. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — радиогалактики

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
12 43 11.22	+73 15 59.3	19.06	4.96	−0.2	2.4	3.3	0.075	1.6
01 19 59.60	+14 47 10.4	17.11	4.83	−1.9	3.1	0.01	0.014	0.3
15 22 40.24	+31 08 56.7	19.02	4.32	−0.9	5.2	1.9	0.116	3.8
23 36 04.96	−31 34 51.0	19.06	3.45	−0.4	1.5	1.3	0.062	0.6

Таблица 9. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — галактики со звездообразованием

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
15 17 22.00	+46 58 12.9	20.61	17.63	−0.5	3.1	2.2	0.154	27.8
15 13 45.76	+31 11 25.1	20.48	7.37	−0.4	5.1	0.5	0.072	0.7
21 24 04.81	−16 41 48.1	19.17	7.01	−0.8	0.0	0.2	0.036	0.5
12 35 02.66	+66 22 33.5	18.22	5.41	−1.7	0.0	0.09	0.047	1.5
14 54 04.58	+36 33 20.5	19.79	5.20	−0.8	5.6	0.4	0.071	0.7
13 36 50.95	+36 50 18.0	18.76	5.15	−0.6	1.6	1.2	0.062	1.5
15 14 44.82	+26 54 32.5	19.96	5.12	−0.3	5.0	4.0	0.138	2.5
14 42 27.61	+55 58 46.4	18.61	4.61	−1.2	1.6	0.5	0.077	2.2
13 00 40.78	+52 32 15.8	18.73	4.20	−0.5	17.3	1.3	0.054	1.0
14 42 14.63	+29 18 08.9	19.46	3.78	−0.7	6.1	0.5	0.062	0.5
00 34 15.47	−27 48 12.7	17.15	3.69	−1.3	6.0	0.006	0.005	0.03
15 08 42.62	+28 10 16.2	18.22	3.65	−1.8	2.1	0.02	0.026	0.3
14 12 22.83	+33 57 15.5	20.04	3.36	−0.3	2.3	2.7	0.116	1.0
15 59 43.94	+27 42 29.7	18.69	3.04	−1.8	0.0	0.06	0.051	0.6
13 29 45.92	+55 36 13.4	17.85	1.35	−1.7	0.0	0.01	0.017	0.05

Таблица 10. Каталог внегалактических источников со значительными собственными движениями — галактики с неопределенным типом

RA (J2000)	DEC (J2000)	G (mag)	μ (mas/yr)	τ	X_v	$L_X \times 10^{42}$ (эрг/с)	z	$L_T \times 10^{42}$ (эрг/с)
04 31 22.51	+60 55 00.2	18.49	7.50	−1.5	0.0	0.010	0.015	0.2
05 08 09.16	+70 05 30.1	19.40	5.93	−0.3	2.6	0.2	0.028	0.2
16 24 33.47	+55 54 52.6	18.54	5.73	−1.7	2.1	0.03	0.031	0.6
16 52 51.42	+17 26 51.0	19.16	5.68	0.5	4.7	2.7	0.034	0.3
16 32 20.70	+64 10 53.5	19.15	5.31	−1.4	2.5	0.1	0.065	1.2
23 35 16.07	−08 57 23.5	20.04	5.23	−0.7	0.0	0.6	0.086	1.0
19 28 52.31	−25 16 38.7	19.17	5.20	−0.9	2.0	1.4	0.108	3.5
05 13 16.43	+66 27 50.2	19.06	5.12	−0.2	2.4	0.1	0.015	0.05
02 25 33.77	+26 44 01.7	18.32	4.86	−1.1	8.5	0.2	0.035	0.6
21 03 17.88	−34 32 33.8	19.44	4.82	−0.3	8.5	1.6	0.071	0.9
17 49 09.10	+61 40 26.1	19.63	4.60	−1.4	2.3	0.03	0.039	0.2
20 20 35.21	+56 14 59.6	18.96	4.47	−0.1	32.6	0.9	0.034	0.3
01 49 18.04	+85 15 37.2	19.33	4.15	−1.4	0.0	0.0004	0.004	0.003
18 11 00.99	+65 33 20.4	18.96	4.08	−2.0	2.1	0.03	0.050	0.6
11 51 06.87	+55 04 43.4	16.15	3.85	−2.0	3.4	0.05	0.020	1.0
00 29 36.79	−17 38 30.4	17.67	3.85	−0.4	9.5	4.1	0.054	2.2
17 36 29.29	+17 40 39.6	18.26	3.68	−1.5	1.6	0.5	0.084	3.2
16 35 09.19	+46 12 50.1	19.04	3.65	−1.2	3.6	0.05	0.031	0.2
06 37 09.94	+53 53 46.1	17.92	3.41	−1.5	0.0	0.09	0.034	0.6
18 02 03.65	+29 06 20.9	18.77	3.27	−1.4	2.0	0.02	0.022	0.10
00 32 46.03	−19 39 30.4	18.91	3.12	−1.4	0.0	0.1	0.054	0.5
11 32 34.85	+53 04 04.5	18.24	3.01	−0.4	2.0	0.007	0.003	0.003
19 54 56.43	−06 28 53.4	17.32	3.01	−0.9	2.0	0.4	0.029	0.6
00 38 26.67	−00 00 42.7	18.23	2.99	−1.5	1.4	0.1	0.045	0.6
01 42 38.57	−04 51 41.1	19.23	2.98	−1.3	0.0	0.06	0.040	0.2
17 09 22.40	−01 40 12.3	19.46	2.97	0.1	5.8	7.4	0.093	0.9
01 08 16.31	−11 34 01.0	18.63	2.85	−0.2	2.5	1.7	0.047	0.4
23 08 11.89	−28 17 52.9	18.64	2.84	−0.2	23.6	12.4	0.119	3.0
02 40 12.22	−02 33 44.4	18.45	2.73	−0.1	5.8	2.4	0.043	0.4
07 06 34.82	+63 50 56.1	18.00	2.58	−0.5	8.4	0.1	0.014	0.06
23 11 19.32	−26 55 08.4	19.23	2.40	−0.2	7.5	1.4	0.055	0.3
23 37 14.39	−12 21 21.9	17.86	2.12	−0.8	1.4	4.9	0.101	3.4
01 44 58.56	−02 31 59.0	17.73	1.98	−0.0	4.7	28.5	0.096	2.9
23 13 48.31	+23 49 14.0	17.91	1.69	−1.2	6.1	0.07	0.021	0.10
02 37 59.99	+19 38 11.8	18.75	1.68	0.3	6.3	2.5	0.034	0.1
16 43 13.78	+09 54 16.2	17.33	1.63	−0.1	3.0	8.2	0.047	0.8
01 17 11.23	−22 09 03.6	18.19	1.52	−0.5	1.8	5.1	0.090	1.2
23 31 09.79	−29 57 44.9	18.48	1.04	−0.3	32.3	2.1	0.053	0.2
07 25 46.68	+53 11 59.1	18.13	0.94	−0.2	5.8	2.2	0.039	0.2
22 43 11.02	+03 28 04.8	17.15	0.84	−0.9	22.8	1.1	0.039	0.4
23 28 04.84	+18 31 53.2	17.60	0.82	−0.2	3.7	1.3	0.023	0.08
23 35 22.95	+45 00 54.5	17.82	0.58	−0.8	16.0	2.3	0.074	0.4

(2023) наблюдаются в стадии до фазы полного слияния ($61_{-9}^{+8}\%$). Таким образом, квазары из нашей выборки со значительными собственными движениями с большой долей вероятности являются двойными ядрами в пределах 60 мили угл. сек или на расстоянии порядка несколько сотен парсек. Для квазара SRGeJ131118.5+463502 нижняя оценка светимости транзиентного источника, приходящегося на интервал каталога Gaia, (L_T) составляет порядка 1.3×10^{44} эрг/с (на рис. 1 на панели с квазарами этот источник выделен синим кружочком). Данный поток превышает значения максимального потока для сверхновых событий и является кандидатом на событие приливного разрушения (TDE) в системе с двойным ядром. Причем в картинной плоскости две СМЧД разделены на угловое расстояние не менее 60 мили угл. сек, что на красном смещении $z = 0.271$ соответствует расстояниям порядка 250 пк. Конечно, для моделирования TDE необходимо использовать более сложную, чем FRED, зависимость с привлечением показательной функции на больших временах от максимума вспышки (ван Вельзен и др., 2021). Подобные события могут проявляться в регистрации собственного движения в каталоге Gaia у сильно переменных АЯГ, обнаруженных в каталоге ePOZITA (Медведев и др., 2022), на период регистрации данной переменности, т.е. при использовании данных Gaia только в период 2020–2022 гг.

5. Для объяснения видимого собственного движения посредством транзиентного события в окрестностях ядра АЯГ имеют место случаи с видимыми собственными движениями выбросов газа, подобных наблюдавшимся в ближайшей мощной радиогалактике M87 (Биретта и др., 1999). Телескоп имени Хаббла позволил наблюдать перемещения деталей в изображении джета с видимыми собственными движениями (μ_{jet}) порядка 20 mas/уг при относительной яркости $R \sim 0.01$ по отношению к оптическому ядру M87. Рассмотренная в Приложении модель с линейным движением транзиента по измеренным Gaia собственным движениям блазаров из табл. 7 дает оценки блеска джета, при собственных движениях джета в 20 mas/уг, порядка 10% от блеска ядра ($R = 0.1$). Полагаясь на видимые звездные величины этих объектов, данное значение, с одной стороны, находится на пределе регистрации детекторами Gaia и на порядок

выше по относительной светимости по сравнению с оптическими деталями джета в M87, но, с другой стороны, опять же по опыту M87, в элемент разрешения Gaia может попасть большая группа деталей джета менее слабых и в совокупности обеспечивающих данное отношение ($R = 0.1$). Таким образом, наличие оптического джета в этих объектах вполне может объяснить видимые собственные движения. В случаях с блазарами не исключено и наличие вспышки в окрестности ядра. Использование астрометрической траектории по данным Gaia может отделить случай движения релятивистского джета от события сильного транзиента. Во втором случае изменение положения источника будет подобно кривой блеска вспышки (рис. 4, 5), как это наблюдалось, например, в данных обсерватории Кеплера при поиске двойных неразрешенных систем (Макаров, Голдин, 2016).

6. АЯГ неопределенного типа показывают явное бинарное распределение по параметру $2.8\mu/\epsilon$. Такое поведение проявляется и в распределениях Sy1 и Sy2. Объединение источников этого типа дает значения максимумов: 2.6 ± 0.7 и 4.7 ± 0.5 . Необходимо отметить, что большее значение аппроксимируется параметром экспоненциального затухания, характерного для событий Сверхновых.
7. В случае с галактиками, где светимость ядра не столь высока, в некоторых случаях видимые собственные движения могут быть модулированы долгопериодическими изменениями блеска звездных объектов. Например, хорошо известная двойная система η Кили в нашей Галактике квазипериодически меняет свой блеск на несколько порядков в течение 5 лет (Даминели, 1996), достигая светимости до 10^{39} эрг/с. Подобные случаи могут быть определены при рассмотрении каталога Gaia на разных временных выборках, разбитых по несколько непересекающихся лет. Они будут показывать долгопериодическую переменность в собственном движении.
8. Для событий приливного разрушения в гравитационном поле сверхмассивной черной дыры изначально фотоцентр должен не совпадать с ядром. Это могут быть случаи с двойным ядром. При светимости ядра ниже 10^{40} эрг/с изначальное смещение фотоцентра может быть обеспечено звездными О-В ассоциациями, интегральная оптическая светимость которых может быть сравнима со светимостью ядра.

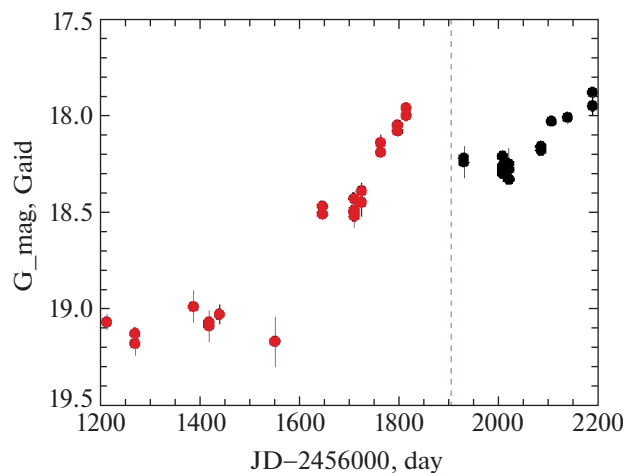


Рис. 2. Оптическая кривая блеска SRGBJ143701.5+264019 (квазар). Красными кружочками показаны данные, соответствующие периоду каталога Gaia eDR3.

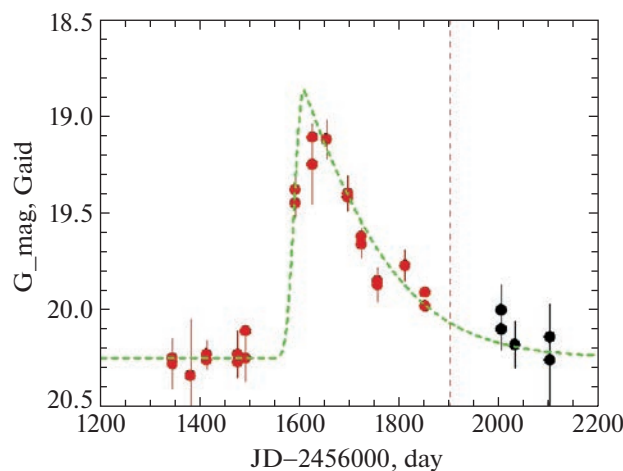


Рис. 3. Оптическая кривая блеска SRGBJ151721.7+465812 (галактика со звездообразованием). Красными кружочками показаны данные, соответствующие периоду каталога Gaia eDR3. Зеленым пунктиром — подгонка вспышки с FRED-профилем.

9. Если наша астрофизическая интерпретация имитации собственных движений в данных Gaia корректна, то после падения блеска транзитного события ниже фотометрического порога регистрации сигнала в последующих измерениях Gaia не будет наблюдаться эффекта собственного движения. Либо направления и амплитуды имитации собственных движений изменятся, в случае если новые транзитные события происходили в этих АЯГ в ходе следующих сканирований Gaia в последующие периоды миссии, после 2017 г.

СОПОСТАВЛЕНИЕ С КАТАЛОГОМ GNT КАНДИДАТОВ

Костржева-Рутковская и др. (2018) представили каталог порядка 480 кандидатов в транзитные события в околоядерных областях галактик, обнаруженные по фотометрическим данным Gaia и каталога галактик SDSS DR12 (GNT-каталог). Среди подтвержденных спектрально источников было найдено два совпадения с GNT: SRGBJ143701.5+264019 и SRGBJ151721.7+465812. На рис. 2 показана кривая блеска источника SRGBJ143701.5+264019 известного как квазар. Красными кружочками показаны данные,

соответствующие периоду каталога Gaia eDR3 (вертикальная пунктирная линия — верхняя граница каталога). Наблюдается монотонный подъем блеска, который продолжился и после окончания каталога Gaia eDR3 с приблизительно двукратным падением потока между 1800 и 2000 днями на графике. Для выделения профиля вспышки необходима детальная позиционная информация. Совершенно иной вид имеет кривая блеска SRGeJ151721.7+465812, в которой определенно выделяется вспышка с FRED-профилем. На рис. 3 показана данная кривая блеска и зеленым пунктиром подгонка вспышки с модельными параметрами: $t_0 = 745^d$, $R_0 = 2.6$, $\sigma = 15^d$, $\alpha = 111^d$. Измеренные в Gaia собственное движение ($17.63 \pm \pm 2.3$ mas/yr) и астрометрический шум (12.2 mas) вместе с параметрами вспышки соответствуют расстоянию транзientа от ядра $X_T \sim 80$ mas. Используя определенное по спектральным данным PTT-150 красное смещение источника $z = 0.154$, получается, что в системе координат объекта транзientное событие произошло на расстоянии 214 пк. Оценка светимости вспышки в максимуме соответствует $L_{\max} = 2.2 \times 10^{43}$ эрг/с, что вместе с экспоненциальным затуханием указывает на имевшее место событие Сверхновой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруживаемая по измерениям Gaia имитация значимых и значительных собственных движений АЯГ и квазаров (выделяемых телескопом СРГ/еРОЗИТА как источников рентеновского излучения) может быть проявлением классических транзientных астрофизических событий. Эти события происходят в околоядерных областях (в картинной плоскости, внутри элемента оптического разрешения Gaia) этого типа внегалактических источников в длительные (несколько лет) периоды высокоточных измерений их оптических координат. Транзientные события, приводящие к смещениям фотоцентров АЯГ и квазаров, должны иметь оптическую светимость, превышающую или сравнимую с оптической светимостью самих АЯГ и квазаров. На наш взгляд, наиболее характерными из известных астрофизических проявлений такого рода транзientных событий являются следующие: вспышки Сверхновых, проявления событий приливного разрушения звезд в двойных СМЧД, высокоамплитудные продолжительные изменения (повышения) блеска массивных звезд-сверхгигантов с истекающими оболочками и звездными ветрами типа η Киля, наличие звездных О-В ассоциаций на фоне АЯГ переменной яркости. Такая интерпретация является астрофизически более обусловленной, нежели попытки объяснить

значительные собственные движения АЯГ и квазаров более экзотическими эффектами.

Это исследование основано на наблюдениях телескопа еРОЗИТА 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/еРОЗИТА 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 еРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения еSASS, разработанного германским консорциумом еРОЗИТА и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа СРГ/еРОЗИТА. Авторы благодарны ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании PTT-150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталии).

Авторы благодарны С.Ю. Сазонову (ИКИ РАН) за полезные обсуждения и замечания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00292.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Определение центра яркости в случае транзientного события

Нами рассмотрено изменение центра суммарной яркости во времени и “данные Gaia” двух объектов: а) квазистационарного и вспыхнувшего на короткое время (год) с заданной кривой блеска; б) квазистационарного и с видимым линейным движением. Объекты рассматриваются точечными.

В обоих случаях исследование можно свести к одномерной модели. В картинной плоскости центр координат привяжем к положению активного ядра, т.е. $X_{AGN} = 0$, а ось X направим от АЯГ в сторону транзientного события (ТС). Очевидно, что центр яркости с транзientным событием на расстоянии X_T от положения АЯГ определяется как

$$X_C = \frac{X_T F_T}{F_T + \langle F_{AGN} \rangle + \xi(t)}, \quad (1)$$

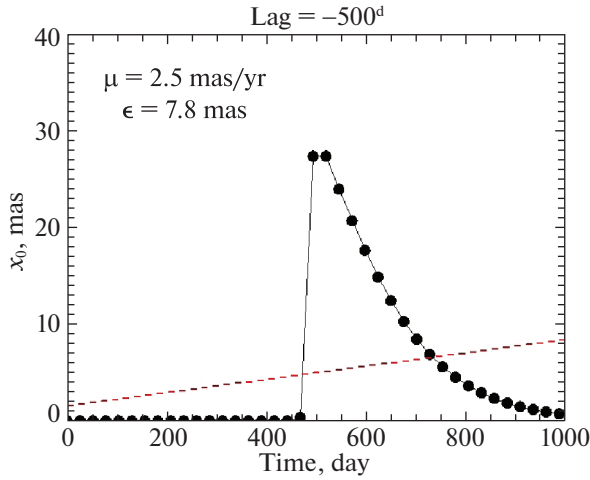


Рис. 4. Вспышка с FRED-профилем, произошедшая через 500 дней после начала обзора. Точками показаны смоделированные измерения центра яркости АЯГ со вспышкой на расстоянии $X_T = 60$ mas от ядра ($R_0 = 1$, $\alpha = 110^\circ$, $\sigma = 10^\circ$). Нулевое значение по оси X соответствует началу обзора Gaia. Приведены оценки собственного движения и астрометрического шума, полученные линейной аппроксимацией всех измерений центра яркости.

где $\langle F_{AGN} \rangle$ — средний поток от АЯГ, F_T — поток от ТС, регистрируемый в заданный момент времени, $\xi(t)$ — стохастическая переменность ядра относительно среднего значения.

Следовательно, имеем два предельных значения X_C :

$$X_C \begin{cases} X_T, & \text{если } F_T \gg F_{AGN}, \\ 0, & \text{если } F_T \ll F_{AGN}. \end{cases} \quad (2)$$

Второе предельное значение достигается достаточно быстро, например, для случая события сверхновой, либо события приливного разрушения. Следовательно, для известных значений собственного движения (μ), измеряемого в каталоге Gaia, и оценке потока от АЯГ, в случаях ТС можно оценить нижнее значение максимального потока транзиента в интервале наблюдений Gaia:

$$F_T = \frac{\mu t_{\text{gaia}}}{X_T - \mu t_{\text{gaia}}} F_{AGN}, \quad (3)$$

где t_{gaia} — временная база каталога Gaia eDR3, на основе которой определялось собственное движение источников, т.е. 2.8 лет. Поскольку оба источника находятся на одинаковом расстоянии, то в формуле (3) потоки можно заменить на светимости источников. Приняв консервативное ограничение максимально возможного значения X_T элементом разрешения детектора Gaia, т.е. 60 мили угл. сек, было подсчитано нижнее значение светимости транзиента. Результаты приведены в табл. 2–10 в девятом столбце (L_T).

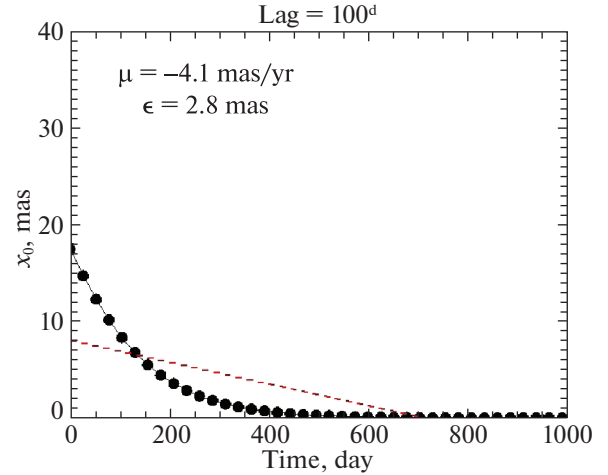


Рис. 5. Изменение фотоцентра при вспышке с FRED-профилем, произошедшей за 100 дней до начала обзора Gaia (параметры модели: $X_T = 60$ mas, $R_0 = 1$, $\alpha = 110^\circ$, $\sigma = 10^\circ$). Отрицательное значение собственного движения в одномерной модели соответствует направлению от вспышки в сторону ядра.

Кроме параметра собственного движения в каталоге Gaia имеется еще и параметр астрометрического шума ϵ (astrometric_excess_noise). Введя новую переменную R как отношение потоков ТС к среднему потоку АЯГ и принимая отношение $\xi(t)$ к сумме потоков ТС и АЯГ на временной базе каталога Gaia меньше единицы, а по сути в интервале времени, когда ТС может быть зарегистрирован детекторами Gaia, (1) принимает вид

$$X_C = \frac{R}{R+1} X_T - \frac{R}{(R+1)^2} \xi'(t) X_T, \quad (4)$$

где $\xi'(t) = \xi(t)/\langle F_{AGN} \rangle$. Второй член суммы в (4), имеющий хаотическое поведение, дает дополнительный малый вклад в астрометрический шум, зависящий от амплитуды внутренней относительной переменности ядра на масштабе регистрации вспышки.

Случай с квазистационарным объектом и объектом, вспыхивающим на заданном расстоянии

Была рассмотрена простая модель влияния вспышки с профилем быстрого роста и экспоненциального угасания (FRED), произошедшей на некотором расстоянии от ядра (X_T). Быстрый подъем обеспечивается гауссианой:

$$R_i = R_0 \begin{cases} e^{-(t_i - t_{\text{peak}})^2 / 2\sigma^2}, & \text{если } t_i \leq t_{\text{peak}}, \\ e^{-(t_i - t_{\text{peak}}) / \alpha}, & \text{если } t_i > t_{\text{peak}}, \end{cases} \quad (5)$$

где t_{peak} — момент максимального потока вспышки, R_0 — отношение потоков ТС и АЯГ на момент t_{peak} , σ — среднеквадратичное отклонение гауссианы, α — параметр экспоненциального затухания,

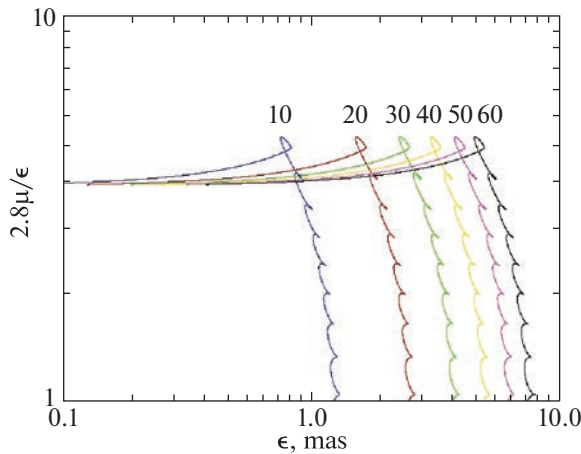


Рис. 6. Изменение модельных кривых в зависимости от расстояния транзientа от ядра X_T ($R_0 = 1$, $\alpha = 110^d$, $\sigma = 10^d$). Цифрами указаны значения данных расстояний в единицах mas.

t_i — моменты наблюдений в каталоге Gaia, которые использованы в модели с некоторым произволом. По параметрам движения обсерватории Gaia каждый источник при обзоре всего неба за 5 лет в среднем наблюдается 70 раз, т.е. не менее одного измерения за 30 дней. Таким образом, для моделирования было принято, что за время обзора t_{Gaia} проведено не менее 39 фотометрических измерений и положений внегалактических источников.

Далее, оценив положение центра яркости X_C по формулам (4) и (5), по всем точкам вычисляются линейной интерполяцией собственное движение μ и среднеквадратичное отклонение от линии ϵ (в ϵ не вошел вклад от стохастической переменности ядра). В зависимости от смещения (LAG) момента максимума вспышки t_{peak} по сравнению с началом обзора Gaia данные дискретные измерения будут приходиться на разные участки вспышки. Можно выделить два случая в зависимости от знака LAG . Первый — при отрицательных значениях максимум вспышки находится внутри периода обзора (рис. 4). Часть измерений центра яркости до вспышки будут соответствовать несмещенным значениям вне зависимости от переменности ядра, т.е. равны нулю. Второй — при положительных значениях максимум вспышки находится до начала обзора (рис. 4) и все измерения центра яркости будут смещенными. В данных примерах не учтена собственная переменность блеска ядра, X_T равняется 60 mas, $R_0 = 1$ и $\sigma = 10^d$.

Рассматриваемая подгонка наблюдаемых параметров (μ , ϵ) FRED-вспышкой является многопараметрической задачей. Действительно, уменьшение параметра X_T , либо уменьшение параметра R_0 приводит к горизонтальному сдвигу решений в сторону уменьшения ϵ (рис. 6, 7), а уменьшение параметра экспоненциального затухания α — к вертикальному сдвигу в сторону уменьшения отношения

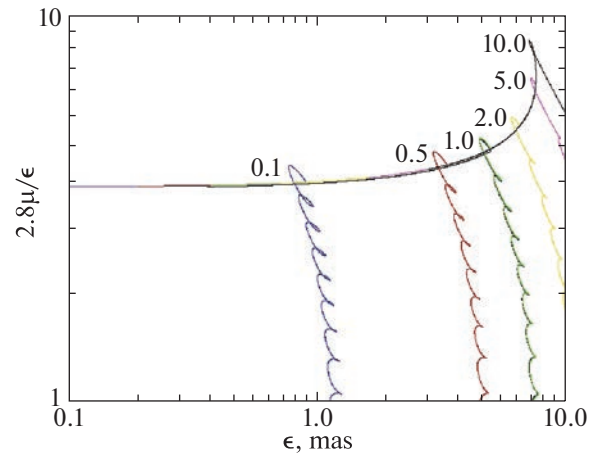


Рис. 7. Изменение модельных кривых в зависимости от отношения потоков транзientного события к потоку от АЯГ в момент t_{peak} , R_0 ($X_T = 60$ mas, $\alpha = 110^d$, $\sigma = 10^d$). Цифрами указаны соответствующие кривым значения R_0 .

собственных движений к астрометрическому шуму (рис. 8). Горизонтальные ветви модельных оценок соответствуют периодам, когда максимум потока транзientного события произошел до начала каталога Gaia, в то время как вертикальная часть приходится на моменты, когда вспышка произошла внутри временного интервала, охватываемым каталогом Gaia. Меньшие значения ϵ на горизонтальной ветви соответствуют большим параметрам LAG , а на вертикальной кривой меньшие значения $2.8\mu/\epsilon$ — меньшим значениям LAG .

Помимо рассмотренного случая с квазистационарным объектом и объектом, вспыхивающим на заданном расстоянии, возможен случай двух квазистационарных объектов (расстояние между объектами X_T), в окрестности одного из которых происходит транзientное событие. В таком случае

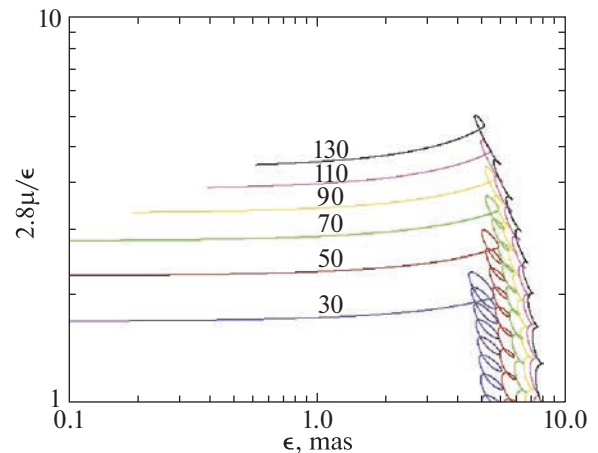


Рис. 8. Изменение модельных кривых в зависимости от параметра экспоненциального затухания α ($R_0 = 1$, $X_T = 60$ mas, $\sigma = 10^d$). Цифрами указаны значения данных параметров в днях.

(1) принимает вид

$$X_C = \frac{X_T F_2 + X_T F_T}{F_1 + F_2 + F_T}, \quad (6)$$

где F_1 и F_2 — потоки от первого объекта и, соответственно, второго, в окрестностях которого имело место транзитное событие. Введя переменную $R = F_T/(F_1 + F_2)$, (6) принимает вид

$$X_C = \frac{X_0 + X_T R}{1 + R}, \quad (7)$$

где $X_0 = X_T F_2/(F_1 + F_2)$ — средняя координата фотоцентра двойной системы в отсутствие транзитного события. Параметры X_C и R являются наблюдательными параметрами Gaia, по которым можно оценить расстояние между объектами и восстановить кривую блеска транзитного события.

*Случай с квазистационарным объектом
и с видимым линейным движением объекта
переменной яркости*

Подобные случаи имеют место с блазарами, которые демонстрируют наличие мощных оптических джетов, направленных к наблюдателю под небольшим углом. Такие выбросы, яркие в оптике ($R \sim 0.01$), с ультрарелятивистскими скоростями наблюдались в ближайшей мощной радиогалактике M87 (Биретта и др., 1999), где телескоп им. Хаббла позволил наблюдать перемещения деталей в изображении джета с видимыми собственными движениями (μ_{jet}) порядка 20 mas/уг. В расчете распределения (μ, ϵ) координата X_T , в отличие от предыдущего случая, меняется линейно со временем: $X_T = X_{T0} + \mu_{\text{jet}} t$, где X_{T0} — координата ТС в начальный момент каталога Gaia. Тогда по формуле (4) видимое собственное движение, регистрируемое Gaia, рассчитывается как

$$\mu = \frac{R}{(R + 1)} \mu_{\text{jet}} + o(\xi').$$

Причем o -малое — от линейной части случайного параметра ξ' , в который помимо относительной переменности ядра входит и относительная переменность джета. А ϵ есть функция отношения потоков ТС к АЯГ (R), относительной внутренней переменности АЯГ и джета (ξ'), координаты ТС в начальный момент времени каталога Gaia (X_{T0}) и видимого собственного движения ТС (μ_{jet}). Расчет этого параметра выходит за пределы данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биретта и др. (J.A. Biretta, W.B. Sparks, and F. Macchetto), *Astrophys. J.* **520**, 621 (1999).
2. 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).
3. Виелен (R. Wielen), *Astron. Astrophys.* **314**, 679 (1996).
4. Даминели (A. Damineli), *Astrophys. J. (Lett.)* **460**, L49 (1996).
5. Клионер и др. (Gaia Collaboration, S.A. Klioner, L. Lindegren, F. Mignard, J. Hernandez, M. Ramos-Lerate, et al.), *Astron. Astrophys.* **667**, id. A148, 31 (2022).
6. Ковалев и др. (Y.Y. Kovalev, L. Petrov, and A.V. Plavin), *Astron. Astrophys.* **598**, L1 (2017).
7. Костржева-Рутковска и др. (Z. Kozłowska-Rutkowska, P.G. Jonker, S.T. Hodgkin, L.L. Wyrzykowski, M. Fraser, D.L. Harrison, et al.), *MNRAS* **481**, 307 (2018).
8. Макаров, Голдин (V.V. Makarov and A. Goldin), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **224**, 19 (2016).
9. Макаров, Секрест (V.V. Makarov and N.J. Secrest), *Astrophys. J.* **933**, 28 (2022).
10. Медведев и др. (P.S. Medvedev, M.R. Gilfanov, S.Y. Sazonov, R.A. Sunyaev, and G.A. Khorunzhev), *Astron. Lett.* **48**, 735 (2022).
11. Пирс и др. (J.C.S. Pierce, C. Tadhunter, C. Ramos Almeida, P. Bessiere, J.V. Heaton, S.L. Ellison, et al.), *MNRAS* **522**, 1736 (2023).
12. Плавин и др. (A.V. Plavin, Y.Y. Kovalev, and L.Y. Petrov), *Astrophys. J.* **871**, 143 (2019).
13. Попович и др. (L.Č. Popović, P. Jovanović, M. Stalevski, S. Anton, A.H. Andrei, J. Kovačević, et al.), *Astron. Astrophys.* **538**, A107 (2012).
14. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1, 16 (2021).
15. Суше и др. (J. Souchay, N. Secrest, S. Lambert, N. Zacharias, F. Taris, C. Barache, et al.), *Astron. Astrophys.* **660**, A16, 1 (2022).
16. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132, 29 (2021).
17. Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р. и др., *Письма в Астрон. журн.* **48**, 828 (2022) [I.M. Khamitov, I.F. Bikmaev, M.R. Gilfanov, R.A. Sunyaev, P.S. Medvedev, M.A. Gorbachev, et al., *Astron. Lett.* **48**, 724 (2022)].
18. Холл и др. (B. Holl, C. Fabricius, J. Portell, L. Lindegren, P. Panuzzo, M. Bernet, et al.), *Astron. Astrophys.* **674**, A25 (2023).
19. ван Вельзен и др. (S. van Velzen, S. Gezari, E. Hammerstein, N. Roth, S. Frederick, C. Ward, et al.), *Astrophys. J.* **908**, 4 (2021).

What Can We Learn about Compton-thin AGN Tori from Their X-Ray Spectra?¹

© 2023 г. F. Melazzini^{1,2}, S. Sazonov^{1*}

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

Поступила в редакцию 21.06.2023

После доработки 21.06.2023; принята к публикации 07.07.2023

We have developed a Monte Carlo code for simulation of X-ray spectra of active galactic nuclei (AGN) based on a model of a clumpy obscuring torus. Using this code, we investigate the diagnostic power of X-ray spectroscopy of obscured AGN with respect to the physical properties and orientation of the torus, namely: the average column density, $\langle N_H \rangle$, the line-of-sight column density, N_H , the abundance of iron, A_{Fe} , the clumpiness (i.e. the average number of gas clouds along the line of sight), $\langle N \rangle$, and the viewing angle, α . In this first paper of a series, we consider the Compton-thin case, where both $\langle N_H \rangle$ and N_H do not exceed 10^{24} cm^{-2} . To enable quantitative comparison of the simulated spectra, we introduce five measurable spectral characteristics: the low-energy hardness ratio (ratio of the continuum fluxes in the 7–11 keV and 2–7 keV energy bands), the high-energy hardness ratio (ratio of the continuum fluxes in the 10–100 keV and 2–10 keV energy bands), the depth of the iron K absorption edge, the equivalent width of the Fe K α line, and the fraction of the Fe K α flux contained in the Compton shoulder. We demonstrate that by means of X-ray spectroscopy it is possible to tightly constrain $\langle N_H \rangle$, N_H and A_{Fe} in the Compton-thin regime, while there is degeneracy between clumpiness and viewing direction.

Keywords: supermassive black holes — active galaxy nuclei — X-ray spectroscopy.

DOI: 10.31857/S0320010823060050, **EDN:** GPDELE

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Antonucci, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 473 (1993).
2. J. Buchner, M. Brightman, K. Nandra, R. Nikutta, F.E. Bauer, *Astron. Astrophys.* **629**, A16 (2019).
3. J. Buchner, M. Brightman, M. Balokovic, K. Wada, F.E. Bauer, K. Nandra, *Astron. Astrophys.* **651**, A58 (2021).
4. D. Burlon, M. Ajello, J. Greiner, A. Comastri, A. Merloni, N. Gehrels, *Astrophys. J.* **728**, 58 (2011).
5. C.P. Dullemond and I.M. van Bemmell, *Astron. Astrophys.* **436**, 47 (2005).
6. U. Feldman, *Phys. Scr.* **46**, 202 (1992).
7. A. Feltre, E. Hatziminaoglou, J. Fritz, A. Franceschini, *MNRAS* **426**, 120 (2012).
8. S. Furui, Y. Fukazawa, H. Odaka, T. Kawaguchi, M. Ohno, K. Hayashi, *Astrophys. J.* **818**, 164 (2016).
9. I.M. George and A.C. Fabian, *MNRAS* **249**, 352 (1991).
10. M. Guainazzi and S. Bianchi, *MNRAS* **374**, 1290 (2007).
11. R.C. Hickox and D.M. Alexander, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 625 (2018).
12. J.S. Kaastra and R. Mewe, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **97**, 443 (1993).
13. Y. Liu and X. Li, *Astrophys. J.* **787**, 52 (2014).
14. Y. Liu and X. Li, *IAU General Assembly, Meet.* **29**, 2249494 (2015).
15. A. Malizia, S. Sazonov, L. Bassani, E. Pian, V. Beckmann, M. Molina, I. Mereminskiy, G. Belanger, *New Astron. Rev.* **90**, 101545 (2020).
16. A.G. Markowitz, M. Krumpke, R. Nikutta, *MNRAS* **439**, 1403 (2014).
17. A. Merloni, et al., *MNRAS* **437**, 3550 (2014).
18. M. Nenkova, Z. Ivezić, M. Elitzur, *Astrophys. J.* **570**, L9 (2002).
19. H. Netzer, *Ann. Rev. Astron. Astrophys. Sov. Sci. Rev., Sect. E: Astrophys. Space Phys. Rev.* **53**, 365 (2015).
20. L.A. Pozdnyakov, I.M. Sobol, R.A. Syunyaev, *Sov. Sci. Rev., Sect. E: Astrophys. Space Phys. Rev.* **2**, 189 (1983).
21. C. Ramos Almeida and C. Ricci, *Nature Astron.* **1**, 679 (2017).
22. C. Ramos Almeida, et al., *Astrophys. J.* **731**, 92 (2011).
23. C. Ricci, et al., *Astrophys. J.* **820**, 5 (2016).

* Электронный адрес: sazonov@cosmos.ru

¹ Полная версия статьи публикуется в английской версии журнала (*Astronomy Letters*, vol. 49, № 6, 2023).

24. G. Risaliti, M. Elvis, G. Fabbiano, A. Baldi, A. Zeza, *Astrophys. J.* **623**, L93 (2005).
25. G. Risaliti, M. Elvis, G. Fabbiano, A. Baldi, A. Zezas, M. Salvati, *Astrophys. J.* **659**, L111 (2007).
26. S.Y. Sazonov and M.G. Revnivtsev, *Astron. Astrophys.* **423**, 469 (2004).
27. S.Y. Sazonov and R.A. Sunyaev, *Astrophys. J.* **543**, 28 (2000).
28. S. Sazonov, M. Revnivtsev, R. Krivonos, E. Churazov, R. Sunyaev, *Astron. Astrophys.* **462**, 57 (2007).
29. S. Sazonov, E. Churazov, R. Krivonos, *MNRAS* **454**, 1202 (2015).
30. M. Stalevski, C. Ricci, Y. Ueda, P. Lira, J. Fritz, M. Baes, *MNRAS* **458**, 2288 (2016).
31. A.T. Steffen, A.J. Barger, L.L. Cowie, R.F. Mushotzky, Y. Yang, *Astrophys. J.* **596**, L23 (2003).
32. R.A. Sunyaev and E.M. Churazov, *Astron. Lett.* **22**, 648 (1996).
33. A. Tanimoto, Y. Ueda, H. Odaka, T. Kawaguchi, Y. Fukazawa, T. Kawamuro, *Astrophys. J.* **877**, 95 (2019).
34. Y. Ueda, M. Akiyama, K. Ohta, T. Miyaji, *Astrophys. J.* **598**, 886 (2003).
35. Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, M.G. Watson, *Astrophys. J.* **786**, 104 (2014).
36. D.A. Verner and D.G. Yakovlev, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **109**, 125 (1995).
37. D.A. Verner, G.J. Ferland, K.T. Korista, D.G. Yakovlev, *Astrophys. J.* **465**, 487 (1996).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНОГО УЗОРА МЛЕЧНОГО ПУТИ ПО МОЛОДЫМ РАССЕЯННЫМ ЗВЕЗДНЫМ СКОПЛЕНИЯМ

© 2023 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 29.06.2023 г.; принята к публикации 07.07.2023 г.

Оценка скорости вращения спирального узора Галактики Ω_p выполнена по большой выборке молодых рассеянных звездных скоплений (РЗС). Для этого было использовано 2494 РЗС моложе 50 млн лет. Средние значения их собственных движений, лучевых скоростей и расстояний были вычислены в работе Хант, Рефферт (2023) по данным каталога Gaia DR3. Для оценки Ω_p применены три способа. Все они основаны на линейной теории спиральной волны плотности Лина и Шу. Первым способом, наиболее надежным с нашей точки зрения, с использованием скоростей возмущения f_R и f_θ , найденным в результате спектрального анализа радиальных V_R и остаточных скоростей вращения ΔV_{circ} , получена оценка $\Omega_p = 24.26 \pm 0.52$ км/с/кпк. Вторым способом скорости f_R и f_θ были найдены из решения основных кинематических уравнений совместно с параметрами вращения Галактики, и получена оценка $\Omega_p = 23.45 \pm 0.53$ км/с/кпк. Третьим способом, основанным на анализе позиционных углов РЗС на момент их рождения θ_{birth} , найдено $\Omega_p = 28.9 \pm 2.8$ км/с/кпк.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, спиральная волна плотности, вращение Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010823060013, **EDN:** GNNXDV

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеется большой интерес к изучению спиральной структуры Галактики. Это стало возможным благодаря появлению высокоточных кинематических данных о таких индикаторах спиральной структуры, как мазерные источники, ОВ-звезды или цефеиды. Например, в работе Бобылева, Байковой (2023) по этим объектам были получены оценки угловой скорости вращения спирального узора.

Список индикаторов галактической спиральной структуры, конечно, более широкий. В частности, рассеянные звездные скопления (РЗС) имеют важное значение для изучения структуры и кинематики Галактики. Данные о РЗС используют для оценки параметров кривой вращения Галактики (Глушкова и др., 1998; Заболотских и др., 2002; Пискунов и др., 2006; Локтин, Попова, 2019; Попова, 2023), геометрических и кинематических характеристик галактической спиральной волны плотности (Амарал, Лепине, 1997; Попова, Локтин, 2005; Наоц, Шавив, 2007; Бобылев и др., 2008; Лепине и др., 2008; Юнкейра и др., 2015; Камарго и др.,

2015; Бобылев, Байкова, 2019; Кантат-Гудин и др., 2020), а также других структурных и кинематических свойств РЗС (Кун и др., 2019; Таррик и др., 2021; Монтейро и др., 2021).

Важным источником массовых данных о тригонометрических параллаксах, собственных движениях и лучевых скоростях звезд являются каталоги, созданные в результате выполнения космического проекта Gaia (Прусти и др., 2016). В версии Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Браун и др., 2021) тригонометрические параллаксы для примерно 500 млн звезд измерены с ошибками менее 0.2 миллисекунд дуги (мсд). Собственные движения около половины звезд каталога измерены с относительной ошибкой менее 10% (ошибка модуля вектора собственного движения). В Gaia EDR3 значения лучевых скоростей были скопированы из предыдущей версии каталога — Gaia DR2 (Браун и др., 2018). В последней опубликованной версии каталога Gaia DR3 (Валенари и др., 2022) существенно улучшены лучевые скорости звезд, а значения параллаксов и собственных движений звезд просто скопированы из Gaia EDR3.

Каталоги, содержащие кинематические характеристики РЗС, быстро обновляются. Например,

*Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

хорошо известны каталоги Диаса и др. (2001, 2006, 2021). В последнем каталоге из этой серии представлены 1743 РЗС, фундаментальные параметры которых определены на основе данных Gaia DR2. Сюда входят оценки среднего расстояния, возраста и компонент собственного движения. Средние значения лучевой скорости вычислены для 831 скопления.

В каталоге Кантат-Гудин и др. (2020) содержатся данные о 2017 РЗС. Охваченными оказались 234 128 звезд-членов этих скоплений. Значения средних параметров РЗС были определены по данным Gaia DR2. Для оценки поглощения, модуля расстояния и возраста скопления была использована искусственная нейронная сеть. По мнению этих авторов, надежные результаты получены для 1867 РЗС.

В каталоге Таррик и др. (2021) даны средние значения лучевой скорости для 1382 РЗС из списка Кантат-Гудин и др. (2020). Лучевые скорости звезд были взяты из различных источников. Средневзвешенные значения лучевых скоростей у 38% этих РЗС можно считать высокондежными, так как они вычислены с использованием более чем трех звезд, ошибки таких средних составляют менее 3 км/с.

В работе Хао и др. (2021) даны средние собственные движения и средние параллаксы 3794 РЗС, вычисленные по данным каталога Gaia EDR3. Оценки возраста собраны этими авторами из различных источников. В работе Хао и др. (2022) описаны еще 704 ранее неизвестных РЗС, найденных по данным каталога Gaia EDR3. Таким образом, каталоги этих авторов образуют одну из наиболее обширных кинематических баз о рассеянных звездных скоплениях Галактики.

Отметим, наконец, работу Йоши, Малхотры (2022), где представлены более 6000 скоплений. Из них для 4378 РЗС имеется информация о расстоянии и возрасте, которая получена с использованием данных Gaia. Именно по таким скоплениям был проведен анализ их пространственного распределения, а также изучена их кинематика. В частности, эти авторы получили новую оценку угловой скорости вращения спирального узора Галактики $\Omega_p = 26.5 \pm 1.5$ км/с/кпк и значение радиуса коротации $R_{\text{cor}} = (1.08^{+0.06}_{-0.05})R_0$. Для этого был выполнен анализ позиционных углов РЗС на момент их рождения.

Целью настоящей работы является анализ кинематики молодых РЗС, представленных в работе Хант, Рефферт (2023), которые были выделены этими авторами уже по данным каталога Gaia DR3.

1. ДАННЫЕ

В работе Хант, Рефферт (2023) представлены 7200 РЗС, которые были выделены по данным каталога Gaia DR3. Для выделения членов скоплений использовался популярный алгоритм кластерного анализа HDBSCAN. Новыми кандидатами в РЗС являются 2420 из общего числа найденных скоплений, 4780 РЗС известны из литературы, включая 134 шаровые скопления. Более строгий раздел каталога содержит 4114 высокондежных РЗС, 749 из которых являются новыми. Для всех РЗС каталога определены такие параметры, как возраст, время жизни и расстояния. Большой процент РЗС в каталоге имеет оценку среднего значения лучевой скорости, вычисленную по данным каталога Gaia DR3.

В настоящей работе для анализа кинематики Галактики и спиральной волны плотности были отобраны РЗС моложе 50 млн лет. При этом были использованы только РЗС с отметкой 'o', т.е. движущиеся группы и шаровые скопления исключались. Не использовались РЗС, лежащие во внутренней области Галактики с $R < 4$ кпк, где имеется сильное влияние центрального бара. Всего отобрано 2494 скопления со средним возрастом 21.1 млн лет. Из них для 1722 РЗС вычислены средние значения лучевых скоростей. Эту выборку мы разделили на две примерно равные части по возрасту. В первую вошли 1332 РЗС моложе 20 млн со средним возрастом 9.6 млн лет. Во вторую вошли 1162 РЗС с возрастными интервалами 20–50 млн со средним возрастом 34.3 млн лет.

На рис. 1 дано распределение РЗС моложе 20 млн лет и с возрастными интервалами 20–50 млн лет в проекции на галактическую плоскость XY . Использована система координат, в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце; направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ (Бобылев, Байкова, 2014), построенный со значением $R_0 = 8.1$ кпк; римскими цифрами пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: I — Щита, II — Киля–Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав. Из рисунка следует, что в обоих случаях отобранные РЗС неплохо трассируют спиральный узор.

2. МЕТОДЫ

Из наблюдений имеем три составляющие скорости звезды: лучевую скорость V_r и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74r\mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, выраженные

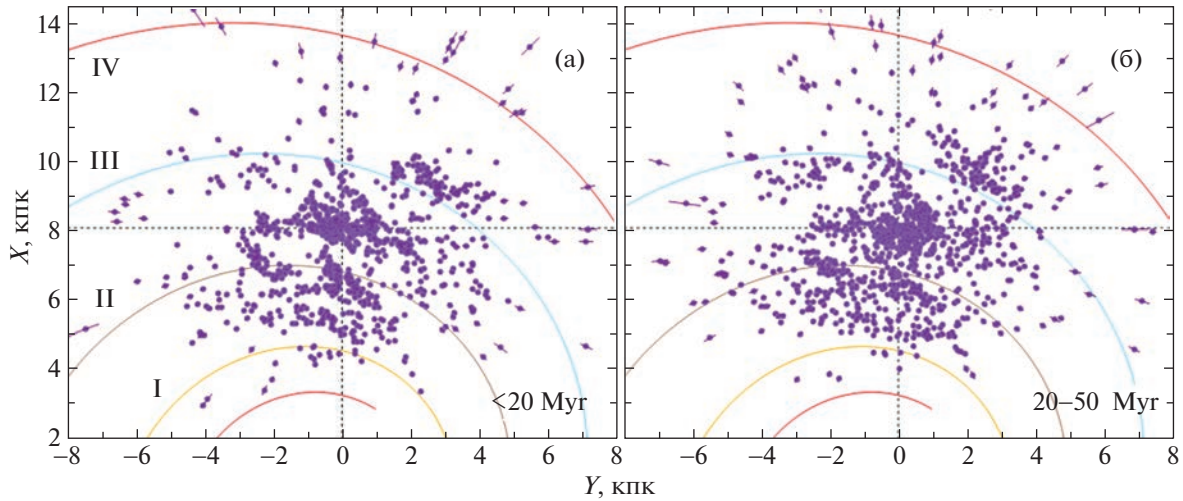


Рис. 1. Распределение в проекции на галактическую плоскость XY РЗС моложе 20 млн лет (а) и с возрастaми в интервале 20–50 млн лет (б).

в км/с. Здесь коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году, а r — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год (миллисекунды дуги в год). Через компоненты V_r , V_l , V_b вычисляются скорости U, V, W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат:

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b, \end{aligned} \quad (1)$$

где скорость U направлена от Солнца к центру Галактики, V — в направлении вращения Галактики и W — на северный галактический полюс. Две скорости: V_R , направленную радиально от галактического центра, и ортогональную ей скорость V_{circ} — направленную в направлении вращения Галактики, можем найти из выражений

$$\begin{aligned} V_{\text{circ}} &= U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \\ V_R &= -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, x, y, z — прямоугольные гелиоцентрические координаты звезды (вдоль соответствующих осей x, y, z направлены скорости U, V, W), V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 . Скорости V_R и W практически не зависят от характера кривой вращения Галактики. Но для анализа периодичностей в тангенциальных скоростях необходимо определить сглаженную кривую галактического вращения и сформировать остаточные скорости ΔV_{circ} .

2.1. Основные кинематические уравнения

Для определения параметров кривой галактического вращения мы используем уравнения, полученные из формул Боттлингера, в которых произведено разложение угловой скорости вращения Галактики Ω в ряд до членов второго порядка малости r/R_0 :

$$\begin{aligned} V_r &= -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l - \\ &- W_\odot \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + \\ &+ 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0 - \\ &- f_R \cos \chi \cos(l + \theta) \cos b + \\ &+ f_\theta \sin \chi \sin(l + \theta) \cos b, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_l &= U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r\Omega_0 \cos b + \\ &+ (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega'_0 + \\ &+ 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega''_0 + \\ &+ f_R \cos \chi \sin(l + \theta) + \\ &+ f_\theta \sin \chi \cos(l + \theta), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_b &= U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - \\ &- W_\odot \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - \\ &- 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0 + \\ &+ f_R \cos \chi \cos(l + \theta) \sin b - \\ &- f_\theta \sin \chi \sin(l + \theta) \sin b, \end{aligned} \quad (5)$$

где R — расстояние звезды от оси вращения Галактики $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$. Скорости $(U, V, W)_\odot$ являются средней групповой скоростью выборки, берутся с обратным знаком и отражают peculiarное движение Солнца; Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на

солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные угловой скорости, $V_0 = |R_0 \Omega_0|$.

В настоящей работе значение R_0 принимается равным 8.1 ± 0.1 кпк согласно обзору Бобылева, Байковой (2021), где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок. А также используется четырехрукавная модель спирального узора Галактики $m = 4$.

Согласно линейной теории волн плотности (Линь, Шу, 1964), возмущения от галактической спиральной волны плотности в скоростях V_R и ΔV_{circ} являются периодическими и описываются функциями следующего вида:

$$\begin{aligned} V_R &= f_R \cos \chi, \\ \Delta V_{\text{circ}} &= f_\theta \sin \chi, \end{aligned} \quad (6)$$

где χ — радиальная фаза спиральной волны

$$\chi = m[\text{ctg}(i) \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_\odot, \quad (7)$$

а $\chi_\odot$ — радиальная фаза Солнца в спиральной волне, m — количество спиральных рукавов, i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающихся спиралей), f_R и f_θ — амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей соответственно. Длина волны λ (расстояние между соседними отрезками спиральных рукавов, отсчитываемое вдоль радиального направления) вычисляется на основе соотношения

$$2\pi R_0 / \lambda = m \text{ctg}(|i|). \quad (8)$$

Из решения системы условных уравнений вида (3)–(5) с учетом (7) можем определить значения следующих неизвестных: $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 , i , $\chi_\odot$, f_R и f_θ .

2.2. Спектральный анализ

Другой подход состоит в том, что из решения системы условных уравнений вида (3)–(5) с исключенными параметрами спиральной волны находим значения всего шести неизвестных: $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 . Затем формируются остаточные скорости V_R , ΔV_{circ} и W . Остаточными они являются в том смысле, что а) из них вычтено пекулярное движение Солнца с найденными значениями $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, и б) в скоростях ΔV_{circ} учтено вращение Галактики с найденными значениями Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 .

Пусть имеется ряд измеренных скоростей V_{R_n} (это могут быть как радиальные V_R , тангенциальные ΔV_{circ} , так и вертикальные W скорости), $n = 1, \dots, N$, где N — число объектов. Задачей спектрального анализа является выделение периодичности из ряда данных в соответствии с принятой

моделью, описывающей спиральную волну плотности с параметрами f , λ (или i) и $\chi_\odot$.

В результате учета логарифмического характера спиральной волны, а также позиционных углов объектов θ_n , наш спектральный (периодограммный) анализ рядов возмущений скоростей сводится к вычислению квадрата амплитуды (спектра мощности) стандартного преобразования Фурье (Байкова, Бобылев, 2012):

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_n(R'_n) \exp\left(-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k}\right), \quad (9)$$

где $\bar{V}_{\lambda_k}$ — k -я гармоника преобразования Фурье с длиной волны $\lambda_k = D/k$, D — период анализируемого ряда,

$$\begin{aligned} R'_n &= R_0 \ln(R_n/R_0), \\ V'_n(R'_n) &= V_n(R'_n) \exp(jm\theta_n). \end{aligned} \quad (10)$$

Пиковому значению спектра мощности S_{peak} соответствует искомая длина волны λ . Угол закрутки спиральной волны плотности находится из выражения (8). Амплитуду и фазу возмущений мы находим в результате подгонки гармоники с найденной длиной волны к измеренным данным. Для оценки амплитуды возмущений также может быть использовано соотношение

$$f_R(f_\theta, f_W) = 2\sqrt{S_{\text{peak}}}. \quad (11)$$

2.3. Оценка скорости Ω_p

В основе подхода, который мы применяем в настоящей работе, лежит вытекающее из линейной теории волн плотности Линя, Шу (1964) соотношение (Рольфс, 1980):

$$\begin{aligned} \chi &= m[\Omega_p - \Omega(R)]t + \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \text{ctg } i = \\ &= \kappa \nu t + \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \text{ctg } i, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\Omega = \Omega(R)$ — угловая скорость вращения Галактики, Ω_p — угловая скорость вращения спирального узора, $\kappa^2 = 4\Omega^2 \left(1 + \frac{R}{2\Omega} \frac{d\Omega}{dR}\right)$ — эпиклическая частота ($\kappa > 0$), $\nu = m(\Omega_p - \Omega)/\kappa$ — частота, с которой пробная частица встречает проходящее спиральное возмущение.

2.3.1. Способ I (ν). С другой стороны, f_R и f_θ имеют следующий вид:

$$f_R = \frac{kA}{\kappa} \frac{\nu}{1 - \nu^2} \mathfrak{S}_\nu^{(1)}(x), \quad (13)$$

$$f_\theta = -\frac{kA}{2\Omega} \frac{1}{1 - \nu^2} \mathfrak{S}_\nu^{(2)}(x), \quad (14)$$

где A — амплитуда потенциала спиральной волны, $k = m \operatorname{ctg} i / R$ — радиальное волновое число, $\mathfrak{S}_\nu^{(1)}(x)$ и $\mathfrak{S}_\nu^{(2)}(x)$ — редукционные факторы:

$$\mathfrak{S}_\nu^{(1)}(x) = \frac{1 - \nu^2}{x} \left[1 - \frac{\nu\pi}{\sin(\nu\pi)} \times \right. \quad (15)$$

$$\left. \times \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} e^{-x(1+\cos(s))} \cos(\nu s) ds \right],$$

$$\mathfrak{S}_\nu^{(2)}(x) = (\nu^2 - 1) \frac{\nu\pi}{\sin(\nu\pi)} \times \quad (16)$$

$$\times \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} e^{-x(1+\cos(s))} \cos(\nu s) ds \right],$$

являющиеся функциями координаты $x = k^2 \sigma_R^2 / \varkappa^2$, где σ_R — среднеквадратическое значение дисперсии радиальных скоростей звезд. Соотношения (13)–(16) позволяют определить Ω_p после подстановки значений параметров ($f_R, f_\theta, \Omega_0, \Omega'_0, \sigma_R$), полученных из наблюдений.

Амплитуду потенциала спиральной волны A оцениваем на основе известного соотношения (Фернандес и др., 2008):

$$A = \frac{(R_0 \Omega_0)^2 f_{r0} \operatorname{tg} i}{m}, \quad (17)$$

где значение отношения радиальной компоненты гравитационной силы, соответствующей спиральным рукам, к общей гравитационной силе Галактики, f_{r0} , берем равным 0.04 ± 0.01 (Байкова, Бобылев, 2012).

2.3.2. Способ II (прямой). Уравнение логарифмической спирали можно записать следующим образом (Юань, 1969):

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \operatorname{tg} i \left(\theta + \frac{\chi - \chi_0}{m} - \Omega_p t \right), \quad (18)$$

где t — время, прошедшее с момента рождения объекта. Из выражения (18) вытекает простое соотношение

$$\Omega_p = \frac{\theta - \theta_{\text{birth}}}{t}, \quad (19)$$

где θ — текущее положение звезды, θ_{birth} — позиционный угол, соответствующий месту рождения звезды, а t — возраст звезды. Если в (10) возраст t выражен в млн лет, то умножая разность $\Delta\theta$, выраженную в радианах, на коэффициент 1023, получим Ω_p в км/с/кпк.

Такой метод оценивания Ω_p , следуя Диасу, Лепине (2005), называем прямым. Его применяют в тех случаях, когда известны пространственные скорости звезд, их индивидуальные возрасты, а иногда (например, Йоши, Малхотра, 2022) и принадлежность к конкретному спиральному рукаву.

Для определения места рождения звезд θ_{birth} интегрируются их галактические орбиты назад во времени с использованием подходящей модели гравитационного потенциала Галактики.

В настоящей работе используем трехкомпонентную осесимметричную модель гравитационного потенциала Галактики, которая содержит вклады от таких подсистем, как центральный балдж, диск и гало темной материи. В этом случае $\Phi(R, z) = \Phi_b(r(R, z)) + \Phi_d(r(R, z)) + \Phi_h(r(R, z))$, где $\Phi_b(r(R, z))$ — вклад балджа, $\Phi_d(r(R, z))$ — вклад диска, и $\Phi_h(r(R, z))$ — вклад гало темной материи. Галактический балдж моделируется сферой Пламмера (Пламмер, 1911):

$$\Phi_b(r) = -\frac{GM_b}{\sqrt{r^2 + b_b^2}}. \quad (20)$$

Диск моделируется сжатым сфероидом в форме, предложенной Миямото, Нагаи (1975):

$$\Phi_d(R, z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + \left[a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2} \right]^2}}. \quad (21)$$

Для представления гало темной материи применяем модель Наварро, Френка, Уайта (Наварро и др., 1997):

$$\Phi_h(r) = -\frac{GM_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right), \quad (22)$$

где M_b, M_d, M_h — массы компонент, b_b, a_d, b_d, a_h — масштабные параметры компонент. В работах Байковой, Бобылева (2016, 2017) подход на основе соотношений (21)–(22) соответствует модели III.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Система условных уравнений вида (3)–(5) решается методом наименьших квадратов (МНК) с весами вида $w_r = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_r}^2}$, $w_l = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_l}^2}$ и $w_b = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_b}^2}$, где S_0 — “космическая” дисперсия, $\sigma_{V_r}, \sigma_{V_l}, \sigma_{V_b}$ — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение S_0 сопоставимо со среднеквадратической невязкой σ_0 при решении условных уравнений вида (3)–(5). В настоящей работе принято $S_0 = 10$ км/с. Система уравнений вида (3)–(5) решалась в несколько итераций с применением критерия 3σ для исключения РЗС с большими невязками.

Таблица 1. Оценки параметров галактического вращения

Параметры	<50 млн лет	<20 млн лет	20–50 млн лет
N_*	2494	1332	1162
N_* с лучевыми скоростями	1722	984	738
$U_\odot$, км/с	8.43 ± 0.24	7.79 ± 0.30	9.22 ± 0.36
$V_\odot$, км/с	8.70 ± 0.27	7.99 ± 0.34	9.65 ± 0.41
$W_\odot$, км/с	7.88 ± 0.22	7.89 ± 0.29	7.85 ± 0.34
Ω_0 , км/с/кпк	29.18 ± 0.13	29.43 ± 0.17	29.00 ± 0.18
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.854 ± 0.030	-3.861 ± 0.041	-3.885 ± 0.044
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.590 ± 0.012	0.592 ± 0.016	0.605 ± 0.017
σ_R , км/с	13.55	12.54	14.66
f_R , км/с	4.7 ± 0.2	5.5 ± 0.4	5.8 ± 0.4
f_θ , км/с	3.7 ± 0.2	4.2 ± 0.4	6.0 ± 0.4

Примечание. N_* — количество использованных звезд, указанные здесь оценки скоростей f_R и f_θ найдены в результате спектрального анализа остаточных скоростей V_R и ΔV_{circ} .

3.1. Метод I

В табл. 1 даны оценки параметров галактического вращения, найденные в результате МНК-решения системы условных уравнений вида (3)–(5) с шестью неизвестными, $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 .

Для трех указанных в таблице выборок были заранее вычислены соответствующие значения дисперсии их скоростей в радиальном (вдоль оси R) направлении σ_R , которые требуются для корректного применения этого метода.

Указанные в таблице оценки скоростей возмущений f_R и f_θ были найдены в результате спектрального анализа остаточных скоростей V_R и ΔV_{circ} . В частности, по выборке РЗС моложе 50 млн лет были также получены следующие оценки: $\lambda_R = 2.4 \pm 0.2$ кпк и $\lambda_\theta = 2.1 \pm 0.2$ кпк, $(\chi_\odot)_R = -154 \pm 11^\circ$ и $(\chi_\odot)_\theta = -129 \pm 10^\circ$. Спектральный анализ вертикальных скоростей этой выборки показал наличие сильнейшего всплеска в околосолнечной окрестности радиусом около 0.5 кпк. Периодические возмущения в вертикальных скоростях РЗС, связанные со спиральной волной плотности, также присутствуют, но имеют очень малую амплитуду. Так, по вертикальным

скоростям мы получили следующие оценки: $f_W = 1.1 \pm 0.4$ км/с, $\lambda_W = 2.2 \pm 0.2$ кпк и $(\chi_\odot)_W = -135 \pm 12^\circ$. Результаты спектрального анализа выборки РЗС моложе 50 млн лет отражены на рис. 2–5.

Применение к выборке РЗС моложе 50 млн лет метода, описанного в подпункте 2.3.1, дало следующее значение угловой скорости вращения спирального узора:

$$\Omega_p = 24.26 \pm 0.52 \text{ км/с/кпк}. \quad (23)$$

Значение радиуса коротации можно вычислить на основе соотношения, полученного путем приравнивания линейной скорости вращения Галактики и найденной скорости вращения спирального узора:

$$R_{\text{cor}} = R_0 + (\Omega_p - \Omega_0)/\Omega'_0. \quad (24)$$

Со значениями Ω_0 и Ω'_0 , взятыми из первого столбца табл. 1, находим

$$R_{\text{cor}} = 9.38 \pm 0.13 \text{ кпк} = (1.16 \pm 0.02)R_0. \quad (25)$$

3.2. Метод II

Здесь для оценки Ω_p применяем подход, сходный с первым способом (подпункт 2.3.1). Отличие

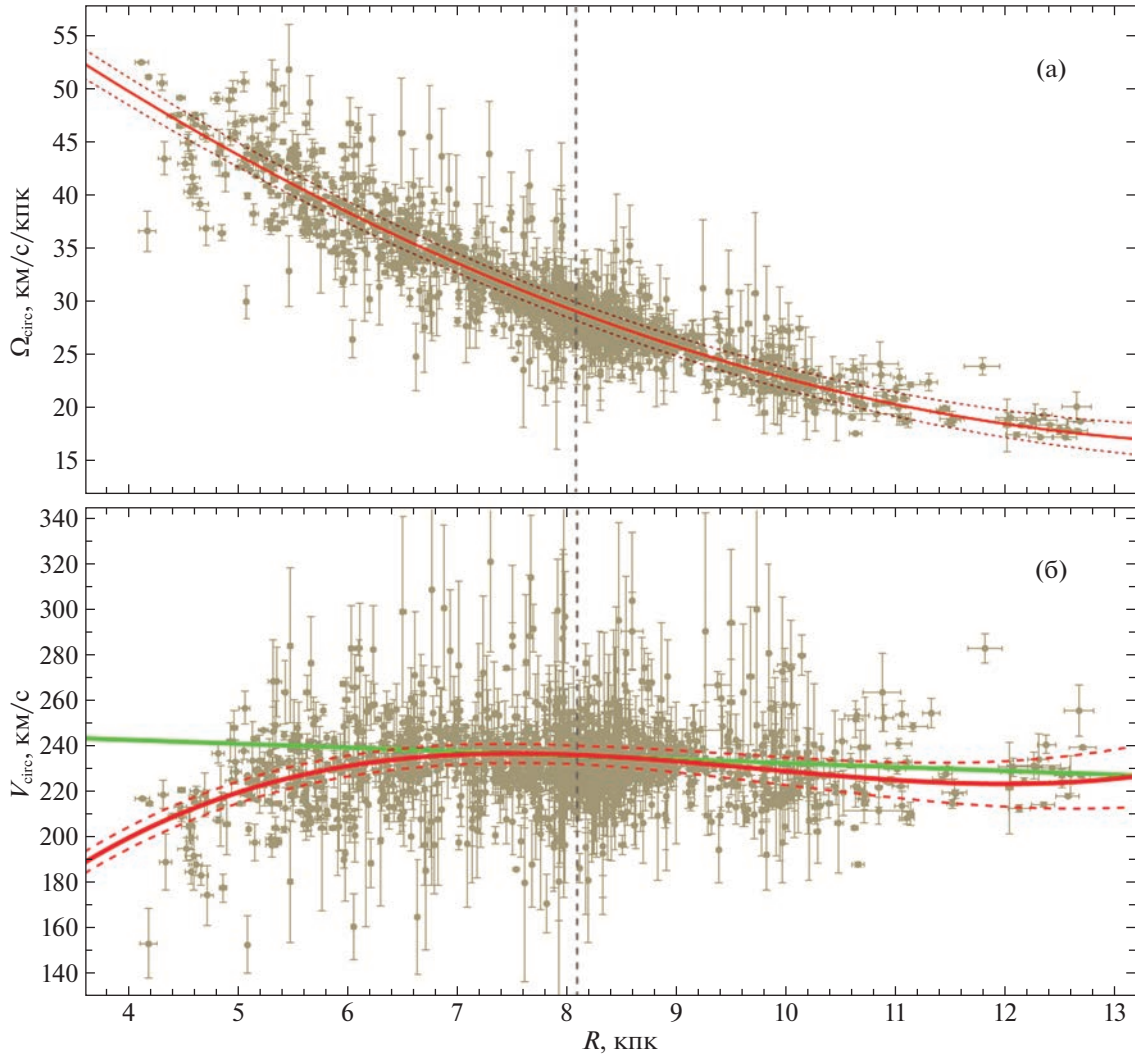


Рис. 2. Угловые Ω_{circ} (а) и линейные V_{circ} (б) скорости кругового вращения выборки РЗС моложе 50 млн лет в зависимости от расстояния R , на каждой панели дана найденная кривая вращения Галактики с указанием границ доверительных областей, соответствующих уровню 1σ , вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца, зеленой линией на панели (б) дана кривая вращения из работы Эйлерса и др. (2019).

заключается в том, что оценки скоростей возмущений f_R и f_θ находим в результате МНК-решения системы условных уравнений вида (3)–(5). Так, по выборке РЗС моложе 50 млн лет были получены следующие оценки:

$$\begin{aligned} U_\odot &= 7.95 \pm 0.26 \text{ км/с}, \\ V_\odot &= 9.85 \pm 0.28 \text{ км/с}, \\ W_\odot &= 7.39 \pm 0.22 \text{ км/с}, \\ \Omega_0 &= 27.46 \pm 0.15 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -3.800 \pm 0.028 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.640 \pm 0.014 \text{ км/с/кпк}^3, \\ i &= -11.8 \pm 0.7^\circ, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \chi_\odot &= -143 \pm 4^\circ, \\ f_R &= -3.32 \pm 0.22 \text{ км/с}, \\ f_\theta &= -2.48 \pm 0.16 \text{ км/с} \end{aligned}$$

при фиксированном значении $R_0 = 8.1 \pm 0.1$. В результате реализации алгоритма, описанного в подпункте 2.3.1, получено

$$\Omega_p = 23.45 \pm 0.53 \text{ км/с/кпк}. \quad (27)$$

Со значениями Ω_0 и Ω'_0 , взятыми из решения (26), находим

$$R_{\text{cor}} = 9.16 \pm 0.14 \text{ кпк} = (1.13 \pm 0.02)R_0. \quad (28)$$

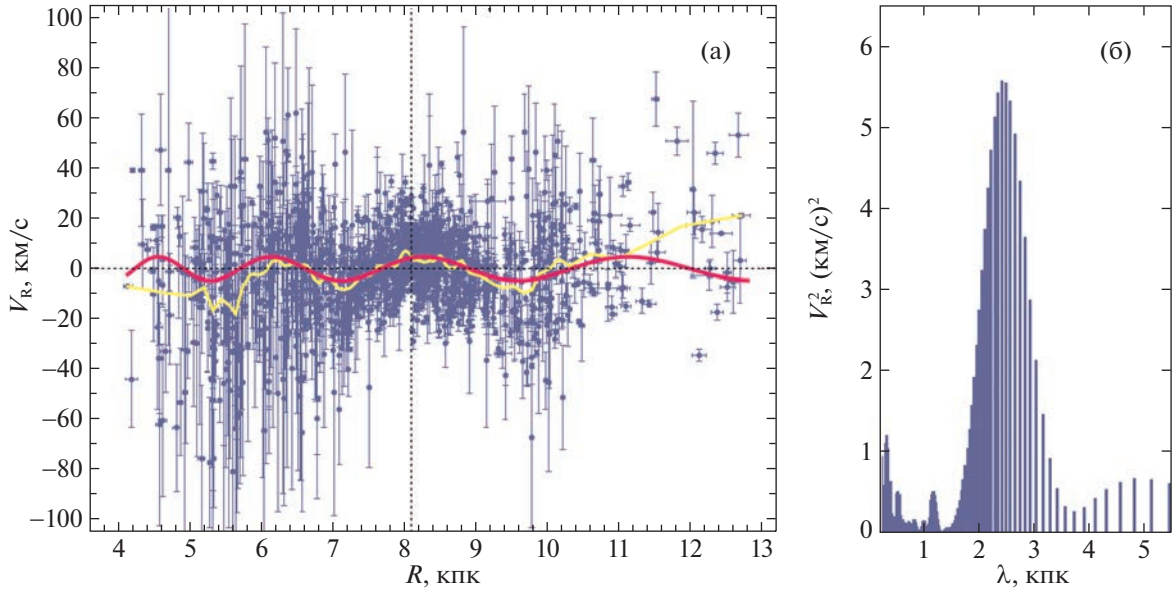


Рис. 3. Радиальные скорости V_R в зависимости от расстояния R выборки РЗС моложе 50 млн лет (а) и их спектр мощности (б). Усредненные данные — желтая линия; периодическая кривая, найденная на основе спектрального анализа, — красная линия.

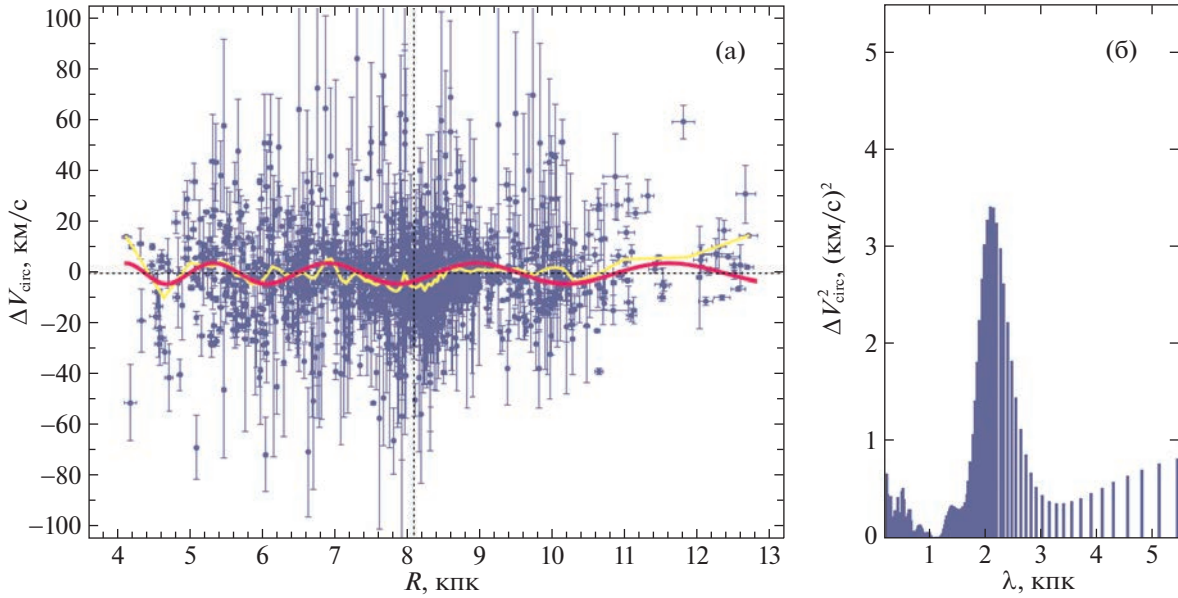


Рис. 4. Остаточные скорости вращения ΔV_{circ} в зависимости от расстояния R выборки РЗС моложе 50 млн лет (а) и их спектр мощности (б). Усредненные данные — желтая линия; периодическая кривая, найденная на основе спектрального анализа, — красная линия.

3.3. Метод III

моложе 50 млн лет найдено

$$\Omega_p = 28.9 \pm 2.8 \text{ км/с/кпк.} \quad (29)$$

Здесь представляем результаты применения прямого метода, описанного в подпункте 2.3.2. На основе интегрирования галактических орбит РЗС

Для уменьшения ошибок скоростей далеких РЗС была использована выборка из примерно

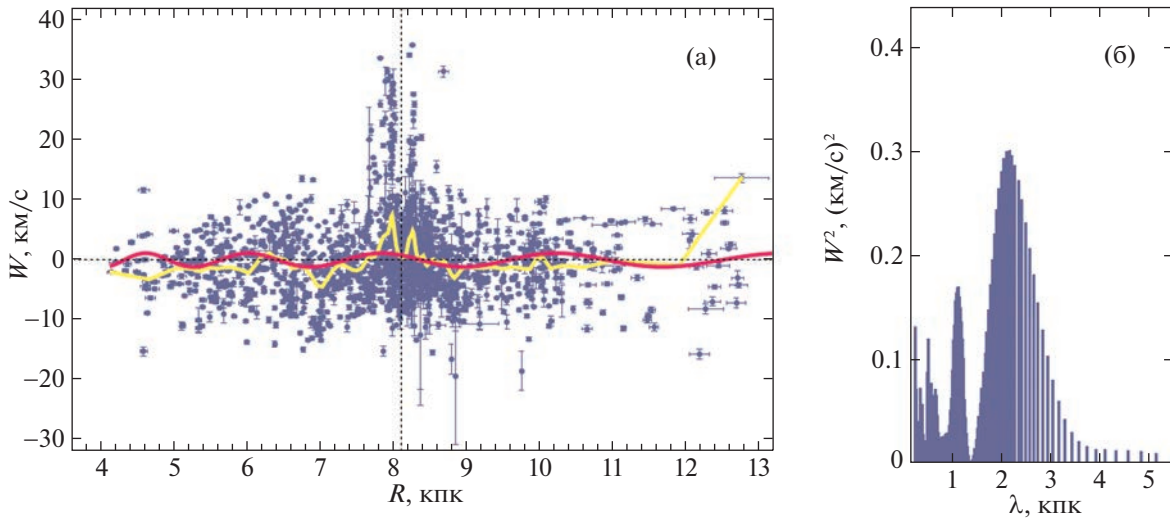


Рис. 5. Скорости W в зависимости от расстояния R выборки РЗС моложе 50 млн лет (а) и их спектр мощности (б). Усредненные данные — желтая линия; периодическая кривая, найденная на основе спектрального анализа, — красная линия.

1500 РЗС, расположенных в околосолнечной окрестности радиусом 3 кпк.

Со значениями Ω_0 и Ω'_0 , взятыми из первого столбца табл. 1, находим

$$R_{\text{cor}} = 8.17 \pm 0.73 \text{ кпк} = (1.01 \pm 0.09) R_0. \quad (30)$$

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе Бобылева, Байковой (2022) была проанализирована выборка из около 150 мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами РСДБ-методом. Использовались мазеры, относительные ошибки измерения тригонометрических параллаксов которых не превышали 10%. По ним были найдены компоненты групповой скорости $(U, V, W)_{\odot} = (9.15, 12.81, 8.93) \pm \pm (0.86, 0.86, 0.75)$ км/с и следующие параметры угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 30.18 \pm 0.38$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.368 \pm \pm 0.077$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.845 \pm 0.037$ км/с/кпк³, где линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 составила $244.4 \pm \pm 4.3$ км/с (для принятого $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк).

Как видно из сравнения с результатами, представленными в табл. 1, за счет большого количества молодых РЗС и первоклассных измерительных данных параметры вращения Галактики по ним определяются с маленькими ошибками. В частности, круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики, найденная по выборке РЗС моложе 50 млн лет, составляет $V_0 = 236.4 \pm 3.1$ км/с (для $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк).

А построенная кривая галактического вращения находится в прекрасном согласии с современными результатами других авторов (рис. 26).

Найденные в настоящей работе двумя способами параметры галактической спиральной волны плотности f_R и f_θ находятся в хорошем согласии с оценками, полученными различными авторами по наиболее важным трассерам спиральной структуры. Обзор таких оценок можно найти, например, в работе Бобылева, Байковой (2022). В частности, по данным о 134 мазерах Бобылев, Байкова (2022) нашли: $f_R = 8.1 \pm 1.4$ км/с, $f_\theta = 6.1 \pm 1.7$ км/с и $f_W = 5.2 \pm 1.5$ км/с.

Отметим, что волна в вертикальных скоростях W с небольшой амплитудой f_W хорошо просматривается только в скоростях самых молодых объектов, таких как мазерные источники (Бобылев, Байкова, 2015; Расторгуев и др., 2017). Малоамплитудную волну видим на рис. 5. Это, по нашему мнению, говорит о высоком качестве измерительных данных РЗС. В то же время на рис. 5 можем видеть необычный всплеск положительных вертикальных скоростей в относительно небольшой околосолнечной окрестности. Этот интересный эффект, возможно связанный со структурой пояса Гулда, требует отдельного изучения.

В работе Бобылева, Байковой (2023) были проанализированы три звездные выборки — галактические мазеры с измеренными тригонометрическими параллаксами, ОБ2-звезды и цефеиды. По этим данным были получены следующие оценки Ω_p : 24.61 ± 2.06 км/с/кпк, 24.71 ± 1.29 км/с/кпк и

25.98 ± 1.37 км/с/кпк по выборке мазеров, OB2-звезд и цефеидам соответственно. Значения радиуса коротации для этих трех выборок составили $R_{\text{cor}}/R_0 : 1.16 \pm 0.09, 1.15 \pm 0.06$ и 1.09 ± 0.06 .

В работе Бобылева, Байковой (2023) также дана таблица с семнадцатью оценками Ω_p , полученными различными авторами тремя методами по молодым объектам. Было показано, что оценки Ω_p , полученные различными авторами в последнее время, лежат в достаточно широком интервале $\Omega_p : 18\text{--}32$ км/с/кпк.

Отметим, что значения Ω_p , полученные нами в настоящей работе методом I и II по трем выборкам, находятся в очень хорошем согласии как между собой, так и с оценками Бобылева, Байковой (2023).

С большей неопределенностью получена оценка (29) методом III. И в то же время эта оценка не противоречит результатам применения метода III другими авторами, что можно видеть из табл. 2 работы Бобылева, Байковой (2023). Отметим, например, результат применения метода III к анализу РЗС в работе Диаса и др. (2019): $\Omega_p = 28.2 \pm 2.1$ км/с/кпк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой для кинематического анализа нам послужили молодые РЗС из каталога Хант, Рефферт (2023). Средние значения их собственных движений, лучевых скоростей и расстояний были вычислены в работе этих авторов по данным каталога Gaia DR3. Важным достоинством каталога Хант, Рефферт (2023) является наличие лучевых скоростей для большого процента РЗС, что позволило выполнить полноценный анализ пространственных скоростей этих скоплений.

Вначале с использованием 2494 РЗС моложе 50 млн лет была получена оценка параметров вращения Галактики. В частности, найдены компоненты скорости Солнца $(U, V, W)_\odot = (8.43, 8.70, 7.88) \pm (0.24, 0.27, 0.22)$ км/с и следующие члены разложения угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 29.18 \pm 0.12$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.854 \pm 0.030$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.590 \pm 0.012$ км/с/кпк³. Здесь круговая скорость вращения окосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 236.4 \pm 3.1$ км/с для принятого расстояния $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк.

Для оценки Ω_p применены три способа, которые основаны на линейной теории спиральной волны плотности Лина и Шу. На основе первого способа, наиболее надежного с нашей точки зрения, с использованием скоростей возмущения

f_R и f_θ , найденным в результате спектрального анализа радиальных V_R и остаточных скоростей вращения ΔV_{circ} , получена оценка $\Omega_p = 24.26 \pm 0.52$ км/с/кпк. Здесь скорости возмущения $f_R = 4.72 \pm 0.24$ км/с и $f_\theta = 3.69 \pm 0.20$ км/с были оценены по пространственным скоростям 1722 РЗС моложе 50 млн лет.

Во втором способе скорости $f_R = 3.32 \pm 0.22$ км/с и $f_\theta = 2.48 \pm 0.16$ км/с были найдены из решения основных кинематических уравнений совместно с параметрами вращения Галактики. Здесь была получена оценка $\Omega_p = 23.45 \pm 0.53$ км/с/кпк.

Третьим способом, основанным на анализе позиционных углов 2494 РЗС моложе 50 млн лет на момент их рождения θ_{birth} , найдено $\Omega_p = 28.9 \pm 2.8$ км/с/кпк.

Отмечен необычный всплеск положительных вертикальных скоростей W в локальной окосолнечной окрестности радиусом ~ 0.5 кпк. Этот эффект, возможно связанный не со спиральной структурой, а с особенностями пояса Гулда, требует отдельного изучения.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амарал, Лепине (L.H. Amaral and J.R.D. Lépine), MNRAS **286**, 885 (1997).
2. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **38**, 617 (2012) [A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, Astron. Lett. **38**, 549 (2012)].
3. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн., **42**, 625 (2016) [A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, Astron. Lett. **42**, 567 (2016)].
4. A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, Open Astronomy **26**, 72 (2017).
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Степанищев А.С., Письма в Астрон. журн. **34**, 570 (2008) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. **34**, 515 (2008)].
6. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), MNRAS **437**, 1549 (2014).
7. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), MNRAS **447**, L50 (2015).
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 151 (2019), [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett. **45**, 109 (2019)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Rep. **65**, 498 (2021)].
10. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **48**, 492 (2022) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett. **48**, 376 (2022)].

11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **49**, 187 (2023), [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett. **49**, 110 (2023)].
12. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 1 (2018).
13. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevey, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **649**, 1 (2021).
14. Валенари и др. (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, F. Arenou, et al.), arXiv: 2208.0021 (2022).
15. Глушкова и др. (E.V. Glushkova, A.K. Dambis, A.M. Mel'nik, and A.S. Rastorguev), Astron. Astrophys. **329**, 514 (1998).
16. Диас и др. (W.S. Dias, J.R.D. Lépine, and B.S. Alessi), Astron. Astrophys. **376**, 44 (2001).
17. Диас, Лепине (W.S. Dias and J.R.D. Lépine), Astrophys. J. **629**, 825 (2005).
18. Диас и др. (W.S. Dias, M. Assafin, V. Flório, B.S. Alessi, and V. Libero), Astron. Astrophys. **446**, 949 (2006).
19. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, J.R.D. Lépine, and D.A. Barros), MNRAS **486**, 5726 (2019).
20. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, A. Moitinho, J.R.D. Lepine, G. Carraro, E. Paunzen, B. Alessi, and L. Villela), MNRAS **504**, 356 (2021).
21. Заболотских М.В., Расторгув А.С., Дамбис А.К., Письма в Астрон. журн. **28**, 516 (2002) [M.V. Zabolotskikh, et al., Astron. Lett. **28**, 454 (2002)].
22. Йоши, Малхотра (Y.C. Joshi and S. Malhotra), arXiv: 2212.09384 (2022).
23. Камарго и др. (D. Camargo, C. Bonatto, and E. Bica), MNRAS **450**, 4150 (2015).
24. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, C. Jordi, M. Romero-Gomez, C. Soubiran, L. Casamiquela, Y. Tarricq, et al.), Astron. Astrophys. **640**, A1 (2020).
25. Кун и др. (M.A. Kuhn, L.A. Hillenbrand, A. Sills, E.D. Feigelson, and K.V. Getman), Astrophys. J. **870**, 32 (2019).
26. Лепине и др. (J.R.D. Lépine, W.S. Dias, and Yu. Mishurov), MNRAS **386**, 2081 (2008).
27. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), Astrophys. J. **140**, 646 (1964).
28. Локтин А.В., Попова М.Э., Астрофиз. Бюлл. **74**, 289 (2019) [A.V. Loktin, M.E. Popova, Astrophys. Bull. **74**, 270 (2019)].
29. Миямото, Нагаи (M. Miyamoto and R. Nagai), Publ. Astron. Soc. Japan **27**, 533 (1975).
30. Монтейро и др. (H. Monteiro, D.A. Barros, W.S. Dias, and J.R.D. Lépine), Front. Astron. Space. Sci. **8**, 62 (2021).
31. Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, and S.D.M. White), Astrophys. J. **490**, 493 (1997).
32. Наоц, Шавив (S. Naoz and N.J. Shaviv), New Astron. **12**, 410 (2007).
33. Пискунов и др. (A.E. Piskunov, N.V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz), Astron. Astrophys. **445**, 545 (2006).
34. Пламмер (H.C. Plummer), MNRAS **71**, 460 (1911).
35. Попова М.Э., Локтин А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 743 (2005) [M.E. Popova, A.V. Loktin, Astron. Lett. **31**, 663 (2005)].
36. Попова М.Э., Астрофиз. Бюлл. **78**, 139 (2023) [M.E. Popova, Astrophys. Bull. **78**, 134 (2023)].
37. Прусты и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann, et al.), Astron. Astrophys. **595**, A1 (2016).
38. Расторгув А.С., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Уткин Н.Д., Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрофиз. Бюлл. **72**, 134 (2017) [A.S. Rastorguev, et al., Astrophys. Bull. **72**, 122 (2017)].
39. Рольфс К., *Лекции по теории волн плотности* (М.: Мир, 1980) [K. Rohlfs, *Lectures on density wave theory*, Springer-Verlag, Berlin, 1977; Mir, Moscow, 1980].
40. Таррик и др. (Y. Tarricq, C. Soubiran, L. Casamiquela, T. Cantat-Gaudin, L. Chemin, F. Anders, T. Antoja, M. Romero-Gomez, et al.), Astron. Astrophys. **647**, A19 (2021).
41. Фернандес и др. (D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra), Astron. Astrophys. **480**, 735 (2008).
42. Хант, Рефферт (E.L. Hunt and S. Reffert), Astron. Astrophys. **673**, A114 (2023).
43. Хао и др. (C.J. Hao, Y. Xu, L.G. Hou, S.B. Bian, J.J. Li, Z.Y. Wu, Z.H. He, Y.J. Li, and D.J. Liu), Astron. Astrophys. **652**, A102 (2021).
44. Хао и др. (C.J. Hao, Y. Xu, Z.Y. Wu, Z.H. Lin, D.J. Liu, and Y.J. Li), Astron. Astrophys. **660**, A4 (2022).
45. Эйлерс и др. (A.-C. Eilers, D.W. Hogg, H.-W. Rix, and M.K. Ness), Astrophys. J. **871**, 120 (2019).
46. Юань (C. Yuan), Astrophys. J. **158**, 889 (1969).
47. Юнкейра и др. (T.C. Junqueira, C. Chiappini, J.R.D. Lépine, I. Minchev, and B.X. Santiago), MNRAS **449**, 2336 (2015).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ НА БАЗЕ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД КАТАЛОГА GAIA DR3

© 2023 г. А. С. Цветков^{1*}, Ф. А. Амосов^{1**}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 07.07.2023 г.; принята к публикации 07.07.2023 г.

Решены звездно-кинематические уравнения Огородникова–Милна в галактической прямоугольной системе координат по полным скоростям для специальной выборки звезд, имеющих данные о лучевых скоростях, из финального каталога Gaia Data Release 3. Найдена область применения линейной модели и области, которые она уже плохо описывает. Построена модель второго порядка, более точно учитывающая особенности кинематики звезд, показана ее применимость для звезд, находящихся на расстоянии до 5 кпк.

Ключевые слова: звездная кинематика, собственные движения, лучевые скорости, вращение Галактики, модель Огородникова–Милна.

DOI: 10.31857/S0320010823060062, EDN: GPGVNY

ВВЕДЕНИЕ

Построение звездно-кинематических моделей поля скоростей звезд в околосолнечном пространстве имеет давнюю историю. Впервые наличие собственных движений звезд было обнаружено Э. Галлеем в 1718 г. Было высказано предположение, что систематические эффекты в собственных движениях звезд вызваны движением Солнца в пространстве. Действительно, для ближайших звезд это — самый значимый эффект. Первые определения апекса солнечного движения были сделаны еще В. Гершелем в 1806 г. В 1859 г. М. Ковальский, а затем Дж. Эри предложили современный метод определения координат апекса и вывели уравнения, носящие теперь их имя.

Следующий по значимости эффект — вращение Галактики — начал активно исследоваться в 1920-х гг. В 1925–1927 гг. Б. Линдبلاد (1927) допустил, что вращающаяся система состоит из ряда подсистем, вращающихся вокруг одной оси, но с различной скоростью. В 1927 г. Я. Оорт (1927) предпринял наблюдательную проверку гипотезы вращения Галактики. Он вывел формулы для определения вращения как по собственным движениям звезд, так и по их лучевым скоростям. В этих формулах не делается никаких предположений

о характере вращения (“твердотельное”, “кеплевское”). Угловая скорость вращения Галактики $\Omega(R)$ представляется в виде отрезка ряда Тейлора, ограниченного двумя первыми членами. В общем случае эти уравнения являются частным случаем формул Боттлингера, подробное описание которых есть в (Бобылев, 2007) и в (Бобылев и др., 2014).

До введения системы J2000.0 в звездно-кинематические уравнения включались еще и параметры к действующей постоянной прецессии (Фрикке, 1977; Витязев, 2000).

В 1930 г. К.Ф. Огородников (1958) изложил более общий подход к анализу собственных движений звезд, основанный на теореме Гельмгольца для движения непрерывных сред. Классический вид этих уравнений, часто называемых моделью Огородникова–Милна, можно найти, например, в (Клубе, 1972).

Во второй половине XX в. внимание исследователей обратилось к аномалиям местной кинематики, часто называемой «Местная система звезд» (Шацова, 1950). В первую очередь это объяснялось наблюдательным материалом, поскольку каталоги того времени содержали в основном близкие звезды, а звезды, находящиеся на расстояниях ближе 100 пк, действительно имеют особую кинематику (Цветков, 1995). Довольно точно исследовать кинематику близких звезд позволил каталог Hipparcos (Перриман, 1997), однако, несмотря на

* Электронный адрес: a.s.tsvetkov@inbox.ru

** Электронный адрес: amosov.f@mail.ru

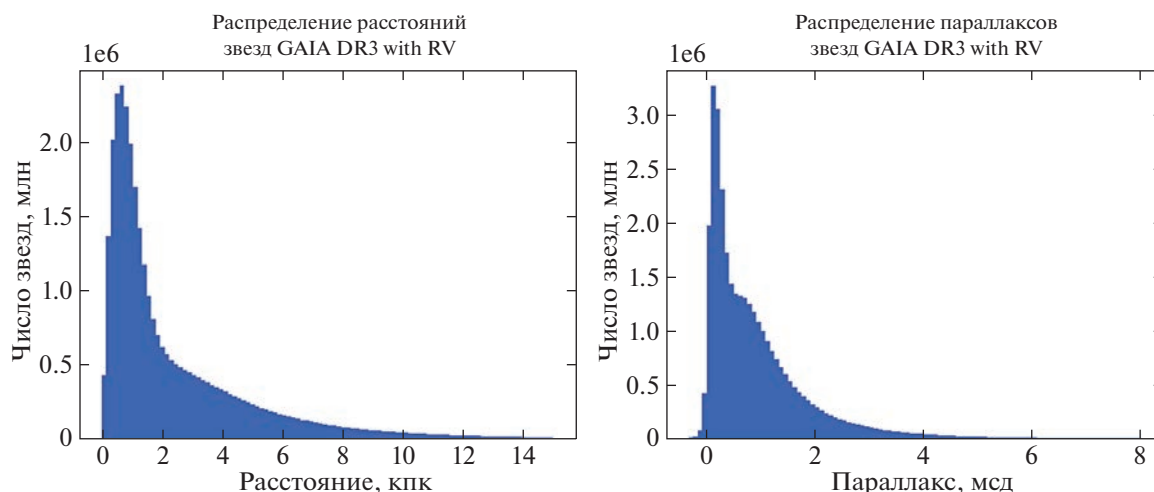


Рис. 1. Распределение звезд Gaia DR3 with RV по расстояниям и параллаксам.

революционное значение этого каталога, он содержал в основном близкие звезды. Наличие индивидуальных параллаксов позволило надежно оценить параметры местной системы звезд (Цветков, 1998).

С появлением массовых звездных каталогов, таких как ХРМ (Фёдоров и др, 2009), PPMXL (Рёзер и др., 2010), UCAC4 (Захариас и др., 2013), появилась возможность исследовать кинематику больших объемов Галактики. Однако отсутствие индивидуальных параллаксов позволяло лишь косвенными методами определять статистические расстояния до звезд. Тем не менее на материале этих каталогов (впрочем, и более ранних) использовались новые формальные кинематические модели, основанные на использовании скалярных и векторных сферических функций. Эти исследования уверенно показали наличие систематических компонент в собственных движениях звезд, которые не описываются полной линейной моделью Огородникова—Милна (Витязев, Цветков, 2013).

Поиск новых моделей приводил к расширению линейной модели дополнительными компонентами, что стало возможно с выходом последних релизов каталога Gaia (ESA, Gaia), так как практически любые нелинейные модели требуют знания расстояний. Основной подход, используемый в этих моделях, — разложение угловой скорости вращения Галактики в ряд Тейлора более высоких порядков. Особо следует отметить статью (Бобылев, Байкова, 2023), где проведено разложение угловой скорости до четвертого порядка и определены коэффициенты этого разложения.

В настоящей работе мы построим полную модель второго порядка, включающую производные по трем направлениям от всех параметров

линейной кинематической модели Огородникова—Милна. В качестве наблюдательного материала использовано все подмножество звезд Gaia, имеющих данные о лучевых скоростях.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАЛОГА GAIA DR3 WITH RV

Каталог Gaia DR3 содержит информацию о 1.8 млрд звезд нашей Галактики (ESA, Gaia); 1.47 млрд звезд имеют данные, как о собственных движениях, так и о параллаксах. Чтобы построить полную трехмерную модель скоростей звезд, необходимо иметь еще и информацию о лучевых скоростях. Каталог Gaia DR3 содержит 33 812 183 звезды с информацией о лучевых скоростях, что дает нам все три компоненты пространственной скорости звезд. Данный подкаталог можно назвать “Gaia DR3 with RV”. Это наиболее важное дополнение к предыдущей версии каталога Gaia Early Release 3 (ESA, Gaia EDR3), из которой астрометрическая часть (а именно данные о координатах, параллаксах и собственных движениях) практически без изменений вошла в финальную третью версию (Браун и др, 2021). Следующая версия ожидается не ранее 2025 г.

Большинство звезд подкаталога Gaia DR3 with RV сосредоточено на расстоянии от 0 до 2 кпк, но также есть звезды на расстояниях свыше 10 кпк (рис. 1). Несмотря на то что авторами GAIA заявлена точность определения параллаксов в 0.01 миллисекунд дуги (мсд) для звезд ярче 15^m , реальная точность GAIA (по крайней мере, текущей версии) оказалась значительно ниже. В полном каталоге свыше 15% звезд имеют отрицательный параллакс (Цветков, 2021). При

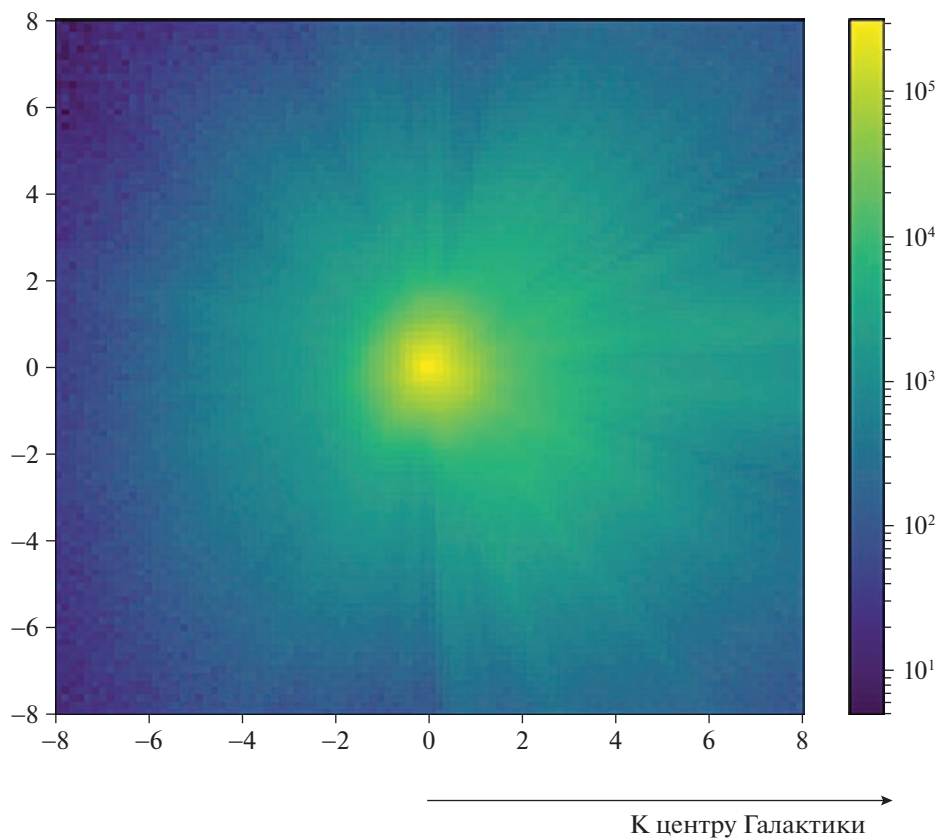


Рис. 2. Плотность распределения звезд Gaia DR3 with RV в проекции на галактическую плоскость. Единицы измерения по осям — кпк, центр Галактики справа.

одинаковой среднеквадратичной погрешности и разных параллаксах естественно ожидать, что относительная точность оценки расстояний будет ниже у более далеких звезд. В частности, относительная точность определения параллаксов звезд, находящихся на расстоянии в несколько килопарсеков, может быть даже хуже 100%. Однако в нашем подмножестве большинство звезд близкие и имеют относительную точность определения параллаксов лучше 1%, что является свидетельством о более высоком астрометрическом качестве каталога Gaia DR3 with RV.

Можно заметить интересную особенность в пространственном распределении звезд. На рис. 2 представлена плотность распределения звезд в тонком диске, толщиной в 200 пк в галактической плоскости XY . Отчетливо видны темные “лучи”. Мы их интерпретируем как возможные проявления пылевой материи, которая экранирует далекие участки, вследствие чего мы в них регистрируем меньшее число звезд. Однако это обстоятельство нуждается в дополнительном исследовании.

Следует отметить, что, по-видимому, звезды с данными о лучевых скоростях имеют и лучшую в целом астрометрическую точность. В этой выборке у 99.5% звезд точность параллакса лучше 1 мсд и у 76.7% относительная точность параллакса лучше 10% (рис. 3), в то время как в полном каталоге лишь 5% имеют относительную точность параллаксов лучше 10%.

Собственные движения имеют весьма удовлетворительную точность (рис. 4). Относительная точность определения собственного движения лучше 20% практически для всех звезд нашего списка.

Что касается лучевых скоростей, то первоначальный план Gaia был сильно редуцирован, и не следует ожидать увеличения числа звезд, имеющих информацию о лучевых скоростях. Точность самих лучевых скоростей звезд подкаталога Gaia DR3 with RV невелика и составляет порядка 3 км/с. Это приводит к довольно высокой относительной ошибке лучевой скорости (рис. 5).

Тем не менее в нашем распоряжении находится уникальный материал: 30 млн звезд, имеющих все

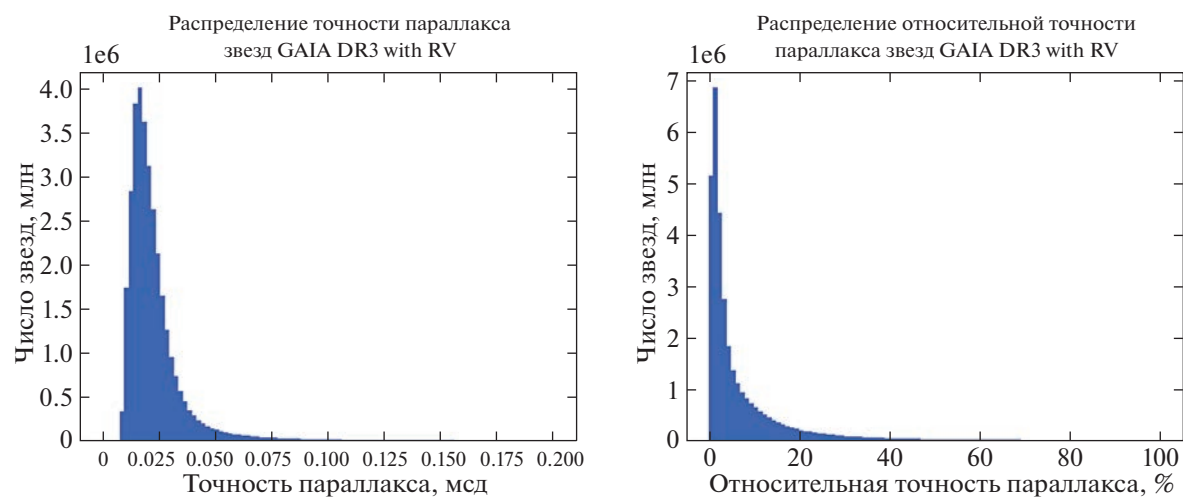


Рис. 3. Распределение звезд Gaia DR3 with RV по абсолютной и относительной точности параллакса.

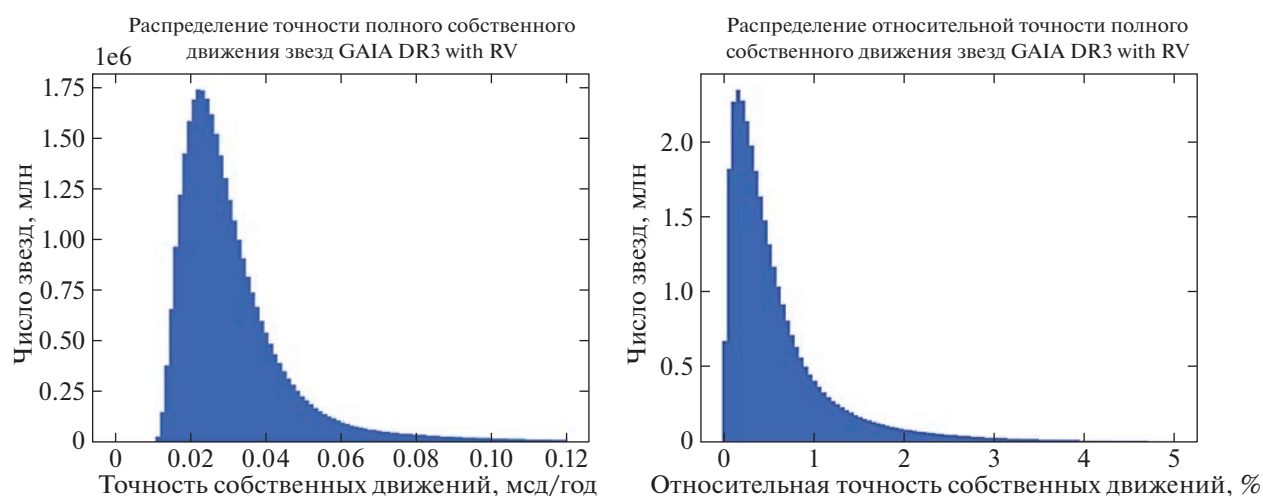


Рис. 4. Распределение звезд Gaia DR3 with RV по абсолютной и относительной точности полных собственных движений.

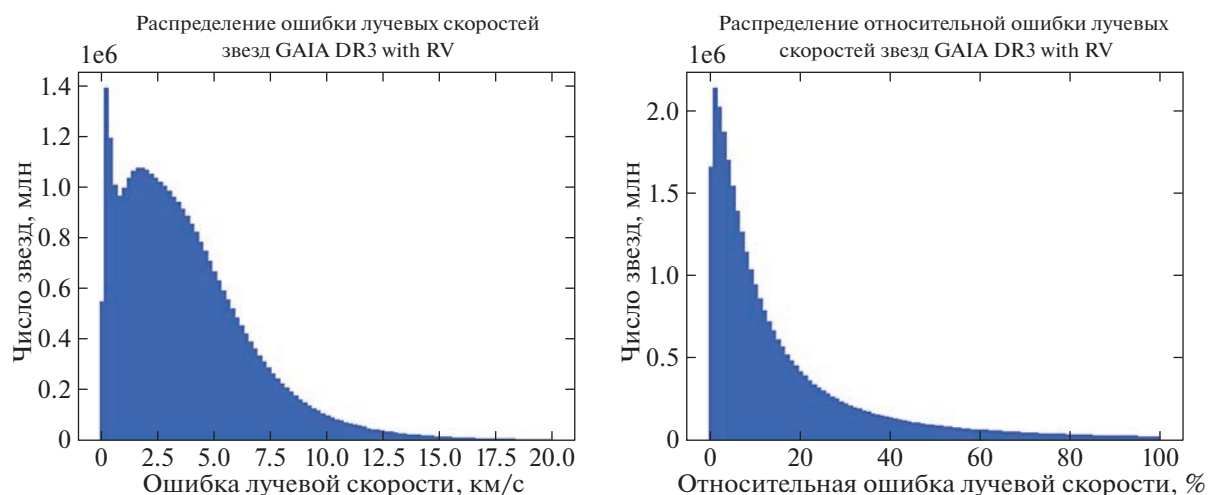


Рис. 5. Распределение звезд Gaia DR3 with RV по абсолютной и относительной точности лучевых скоростей.

три пространственные координаты и три компоненты скорости, что позволяет перейти в прямоугольную систему координат, в которой многие кинематические эффекты видны нагляднее. Для проведения расчетов мы ограничились звездами с расстояниями до 8 кпк (30 667 161 из 33 812 183 звезд Gaia DR3 with RV). Звезды с отрицательными параллаксами отбрасывались.

Мы сознательно не делаем никаких дополнительных ограничений на выборку (по показателю цвета, светимости и другим возможным характеристикам), так как наша работа носит скорее математический характер, предлагая новый метод описания звездной кинематики сразу большой совокупности звезд.

В наших вычислениях мы использовали простые оценки расстояния $1/\pi$, хотя используются и другие способы (см., например, Байлер-Джонс и др., 2021).

МОДЕЛЬ ОГОРОДНИКОВА–МИЛНА В ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТАХ

В силу особенностей построения любых звездных каталогов и, особенно, плохих знаний параллаксов, традиционно используют представление моделей собственных движений и лучевых скоростей звезд в сферической гелиоцентрической системе координат (экваториальной или галактической). Подробно вывод таких уравнений представлен, например, в статье (Цветков, Амосов, 2019). Этот подход порождает довольно громоздкие уравнения с обилием тригонометрических функций, но долгое время оставался единственно оправданным. Имея же все три пространственных координаты и все три компоненты скорости, можно представить полную скорость звезды в галактической прямоугольной системе координат в очень простой форме (Огородников, 1958):

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -U \\ -V \\ -W \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & M_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где U, V, W — скорость движения Солнца относительно местного стандарта покоя, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — параметры твердотельного вращения звездной системы, $\mathbf{M}$ — симметричный тензор деформации поля скоростей, x, y, z — галактические декартовы координаты звезды.

Представление (1) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} v_x &= -U + M_{11}x + (M_{12} - \omega_z)y + (M_{13} + \omega_y)z, \\ v_y &= -V + (M_{12} + \omega_z)x + M_{22}y + (M_{23} - \omega_x)z, \\ v_z &= -W + (M_{13} - \omega_y)x + (M_{23} + \omega_x)y + M_{33}z. \end{aligned} \quad (2)$$

Если сделать переобозначения для коэффициентов при x, y, z , то мы получим линейное разложение скорости в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} v_x &= -U + a_x x + a_y y + a_z z, \\ v_y &= -V + b_x x + b_y y + b_z z, \\ v_z &= -W + c_x x + c_y y + c_z z. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты этой системы можно легко определить методом наименьших квадратов. Из них однозначно получаются все параметры модели Огородникова–Милна (2) путем элементарных преобразований.

Результат расчета параметров линейной модели по 30 млн. ближайших звезд подкаталога Gaia DR3 with RV приведен в табл. 1. Этому решению соответствуют параметры модели Огородникова–Милна, приведенные в табл. 2.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ

Считается, что область применимости линейной кинематической модели составляет не более 1–1.5 кпк от Солнца. Причем в самой ближайшей окрестности Солнца, как уже говорилось ранее, проявляются местные аномалии звездной кинематики. В нашей предыдущей работе (Цветков, 2022) показана стабильность параметров Огородникова–Милна для выборок до 1 кпк и даже, неожиданно для нас, для выборок на больших расстояниях за одним исключением — параметр движения Солнца V вдоль оси Y вращения Галактики начинает расти с расстоянием. Мы выявим причину этого явления. В настоящей работе проведено решение для всей группы звезд (поскольку мы учитываем индивидуальные параллаксы звезд), но и здесь мы видим аномально большое значение скорости движения Солнца V (табл. 2). В той же работе (Цветков, 2022) продемонстрировано, что основной вклад в увеличение значения этого параметра вносят далекие звезды.

Таблица 1. Коэффициенты линейной модели, определенные по звездам Gaia DR3 with RV, находящимся ближе 8 кпк

U	11.264 ± 0.009	a_x	-0.865 ± 0.005	a_y	27.823 ± 0.005	a_z	-0.343 ± 0.015
V	30.753 ± 0.009	b_x	-11.174 ± 0.004	b_y	0.338 ± 0.005	b_z	-0.576 ± 0.014
W	7.906 ± 0.006	c_x	-0.437 ± 0.003	c_y	0.217 ± 0.003	c_z	0.212 ± 0.009
	км/с		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹

Таблица 2. Параметры модели Огородникова–Милна, определенные по звездам Gaia DR3 with RV, находящимся ближе 8 кпк

U	11.264 ± 0.009	ω_x	0.397 ± 0.007	M_{11}	-0.865 ± 0.005	M_{12}	8.324 ± 0.003
V	30.753 ± 0.009	ω_y	0.047 ± 0.008	M_{22}	0.338 ± 0.005	M_{13}	-0.390 ± 0.008
W	7.906 ± 0.006	ω_z	-19.498 ± 0.003	M_{33}	0.212 ± 0.009	M_{23}	-0.180 ± 0.007
	км/с		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹

Таблица 3. Усредненное значение параметров остаточных скоростей dv_x , dv_y , dv_z для выборок вдоль оси X галактической системы координат для звезд с $|y| < 100$ пк, $|z| < 100$ пк. В качестве x указано расстояние до левой границы выборки в кпк. Остаточные скорости указаны в км/с

x	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
dv_x	-9.6	-9.4	-8.5	-6.6	-5.8	-4.2	0.4	2.8	5.4	1.8	0.5	-3.0	-3.0	0.4	1.3	1.6	1.1	2.4	7.4	6.8
dv_y	-53.0	-45.9	-40.3	-34.8	-28.9	-21.0	-15.5	-8.3	0.2	6.8	11.8	19.3	25.0	29.5	29.9	31.5	31.8	29.9	22.6	26.3
dv_z	2.2	0.4	0.0	0.1	0.0	0.2	0.3	-0.5	0.2	0.0	0.4	0.8	0.6	0.5	0.4	-0.5	-0.7	-1.2	-0.2	-1.4

Таблица 4. Усредненное значение параметров остаточных скоростей dv_x , dv_y , dv_z для выборок вдоль оси Y галактической системы координат для звезд с $|x| < 100$ пк, $|z| < 100$ пк. В качестве y указано расстояние до левой границы выборки в кпк. Остаточные скорости указаны в км/с

y	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
dv_x	17.2	7.1	2.2	8.3	3.0	2.4	1.7	0.6	0.4	1.3	1.5	1.7	1.6	-0.2	-0.6	-3.2	-3.6	-6.9	-8.9	-7.5
dv_y	-9.5	-5.6	-8.9	-1.6	-1.4	0.5	4.1	8.6	9.8	8.9	9.5	10.6	8.9	5.2	0.9	-3.5	-8.9	-12.6	-16.6	-21.7
dv_z	-3.3	-0.8	-1.3	0.2	-0.1	-0.1	0.2	0.6	0.5	0.3	0.2	0.5	0.5	0.3	0.2	-0.6	-0.7	-1.4	-1.4	-1.2

Убедиться в неприменимости линейной модели дальше 1 кпк можно, рассмотрев поведение остаточных скоростей с ростом расстояния. Остаточной скоростью назовем скорость звезды за вычетом скорости, рассчитанной по модели

$$\begin{aligned} dv_x &= v_x - (-U + a_x x + a_y y + a_z z), \\ dv_y &= v_y - (-V + b_x x + b_y y + b_z z), \\ dv_z &= v_z - (-W + c_x x + c_y y + c_z z). \end{aligned} \quad (4)$$

Полученные остаточные скорости dv_x , dv_y , dv_z можно изобразить в проекции на галактическую плоскость XY (рис. 6). Численное значение остаточных скоростей вдоль осей X и Y представлено в табл. 3 и 4.

Мы видим, что остаточные скорости звезд имеют значения менее 10 км/с в небольшой окрестности Солнца. На более далеких расстояниях разница между ними начинает расти и достигает

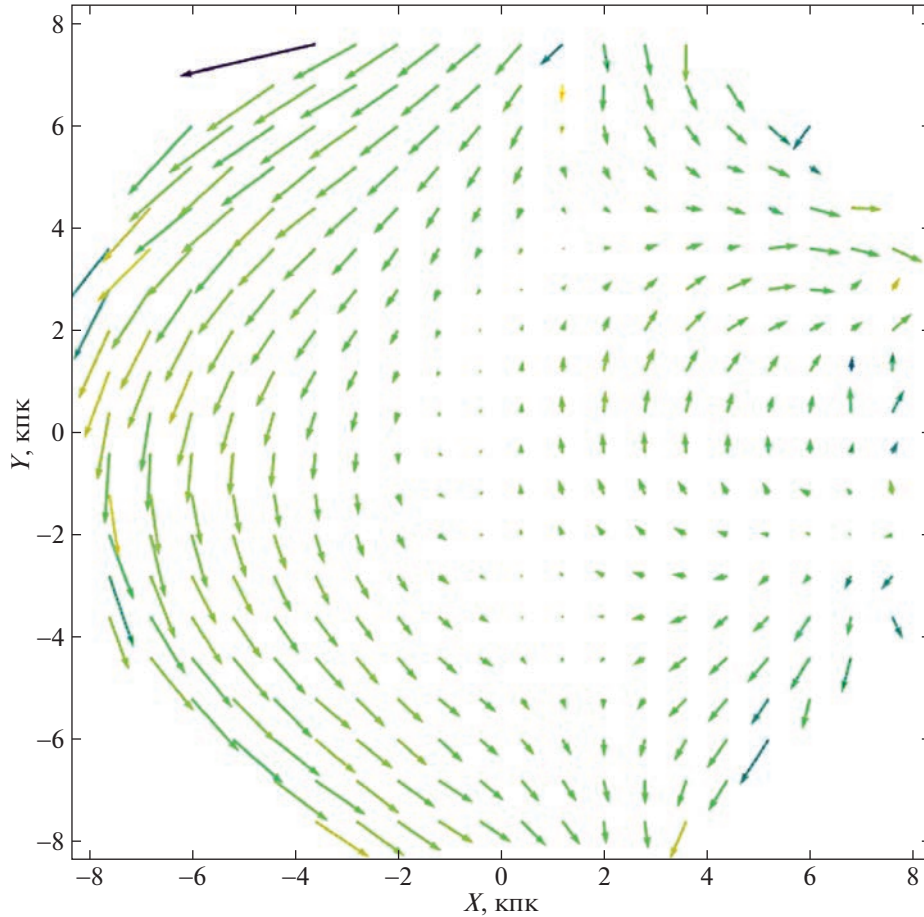


Рис. 6. Остаточные скорости dv_x , dv_y , dv_z звезд с $|z| < 100$ пк в проекции на галактическую плоскость XY для звезд, находящихся ближе 8 кпк. Галактический центр справа. Каждая стрелка соответствует спроецированной усредненной скорости в столбике по оси Z .

нескольких десятков км/с. На рис. 6 область малых остаточных скоростей отчетлива видна и имеет вид вытянутого участка вдоль направления вращения Галактики.

КВАДРАТИЧНАЯ МОДЕЛЬ

Естественным расширением линейной модели (4) является квадратичная модель (5). При этом смысл коэффициентов при функциях второго порядка — линейные комбинации частных производных по разным направлениям от различных параметров модели Огородникова—Милна:

$$\begin{aligned} v_x &= -U + a_x x + a_y y + a_z z + a_{xx} x^2 + & (5) \\ &+ a_{yy} y^2 + a_{zz} z^2 + a_{xy} xy + a_{xz} xz + a_{yz} yz, \\ v_y &= -V + b_x x + b_y y + b_z z + b_{xx} x^2 + \\ &+ b_{yy} y^2 + b_{zz} z^2 + b_{xy} xy + b_{xz} xz + b_{yz} yz, \\ v_z &= -W + c_x x + c_y y + c_z z + c_{xx} x^2 + \end{aligned}$$

$$+ c_{yy} y^2 + c_{zz} z^2 + c_{xy} xy + c_{xz} xz + c_{yz} yz.$$

Результат расчета коэффициентов формулы (5) методом наименьших квадратов по 30 млн звезд Gaia DR3 with RV представлен в табл. 5.

Видим, что значение $V = 21.64$ км/с приняло свое обычное значение, получаемое для ближайшей окрестности Солнца. Тем самым, данная модель, с одной стороны, позволяет получать достоверные значения параметров движения Солнца относительно местного стандарта покоя, с другой, за счет квадратичных членов работает на больших расстояниях, вплоть до центра Галактики.

По аналогии с остаточными скоростями линейной модели dv_x, dv_y, dv_z можно рассчитать остаточные скорости квадратичной модели dv'_x, dv'_y, dv'_z . Эти данные приведены в табл. 6 и 7 и проиллюстрированы на рис. 7.

Данные табл. 6 и 7 показывают, что область применимости квадратичной модели значительно

Таблица 5. Коэффициенты квадратичной модели, построенной по звездам Gaia DR3 with RV

U	11.405 ± 0.010	a_x	-0.493 ± 0.006	a_y	25.046 ± 0.005	a_z	-0.404 ± 0.017
V	21.644 ± 0.008	b_x	-4.774 ± 0.005	b_y	-0.023 ± 0.005	b_z	-1.83 ± 0.014
W	7.838 ± 0.006	c_x	-0.507 ± 0.004	c_y	0.190 ± 0.003	c_z	0.148 ± 0.011
	км/с		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹
a_{xx}	-0.507 ± 0.004	a_{yy}	0.049 ± 0.001	a_{zz}	0.065 ± 0.007		
b_{xx}	-1.811 ± 0.001	b_{yy}	-1.115 ± 0.001	b_{zz}	-8.727 ± 0.006		
c_{xx}	0.037 ± 0.001	c_{yy}	-0.036 ± 0.001	c_{zz}	-0.181 ± 0.004		
a_{xy}	2.306 ± 0.002	a_{xz}	0.092 ± 0.005	a_{yz}	-0.122 ± 0.006		
b_{xy}	0.117 ± 0.002	b_{xz}	0.273 ± 0.004	b_{yz}	0.332 ± 0.005		
c_{xy}	0.027 ± 0.001	c_{xz}	0.060 ± 0.003	c_{yz}	0.312 ± 0.004		
	км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹		км/с · кпк ⁻¹

Таблица 6. Усредненное значение параметров остаточных скоростей dv'_x , dv'_y , dv'_z для выборок вдоль оси X галактической системы координат для звезд с $|y| < 100$ пк, $|z| < 100$ пк. В качестве x указано расстояние до левой границы выборки кпк. Остаточные скорости указаны в км/с

x	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
dv_x	-5.5	-5.9	-6.0	-5.0	-3.8	-1.9	0.9	3.3	4.4	2.5	0.0	-2.6	-2.6	-1.7	-1.8	0.4	2.4	3.4	5.5	5.2
dv_y	11.9	7.4	2.4	-1.6	-3.7	-5.2	-6.3	-5.9	-3.4	-0.8	2.7	6.6	8.5	9.7	11.5	14.4	16.3	17.1	17.7	18.6
dv_z	0.8	-0.4	-0.2	-0.5	-0.3	-0.1	-0.3	-0.6	-0.2	0.2	0.3	0.5	0.4	0.5	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.4	-2.5

Таблица 7. Усредненное значение параметров остаточных скоростей dv'_x , dv'_y , dv'_z для выборок вдоль оси Y галактической системы координат для звезд с $|x| < 100$ пк, $|z| < 100$ пк. В качестве r указано расстояние до левой границы выборки в кпк. Остаточные скорости указаны в км/с

r	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
dv_x	0.7	-1.9	-3.6	-4.9	-5.9	-5.9	-4.6	-3.3	-1.7	-0.1	1.8	3.0	4.3	5.5	6.3	6.0	5.0	4.0	2.3	-0.6
dv_y	-0.4	-1.6	-2.0	-1.4	-0.5	0.8	2.6	3.9	3.6	2.3	2.6	4.2	5.8	5.4	3.1	1.2	-0.1	-0.6	-0.7	-0.4
dv_z	0.2	-0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.0	-0.2	-0.4	-0.2	-0.6	-0.7	-0.7

шире, чем у линейной, и может достигать 4–5 кпк, за исключением небольшой области ближе к центру Галактики (рис. 8). Наличие систематических составляющих в остаточных скоростях звезд, удаленных более чем на 5 кпк, может быть обусловлено как более сложным вращением Галактики, так и недостаточным количеством звезд с хорошей точностью всех шести кинематических параметров на таких расстояниях.

СМЫСЛ ПАРАМЕТРОВ КВАДРАТИЧНОЙ МОДЕЛИ

Для того чтобы объяснить физическое значение коэффициентов при квадратичных функциях, представим коэффициенты линейной модели не как константы, единые для всей выборки, а как функции от x, y, z :

$$v_x(x, y, z) = -U + a_x(x, y, z)x + a_y(x, y, z)y + a_z(x, y, z)z, \quad (6)$$

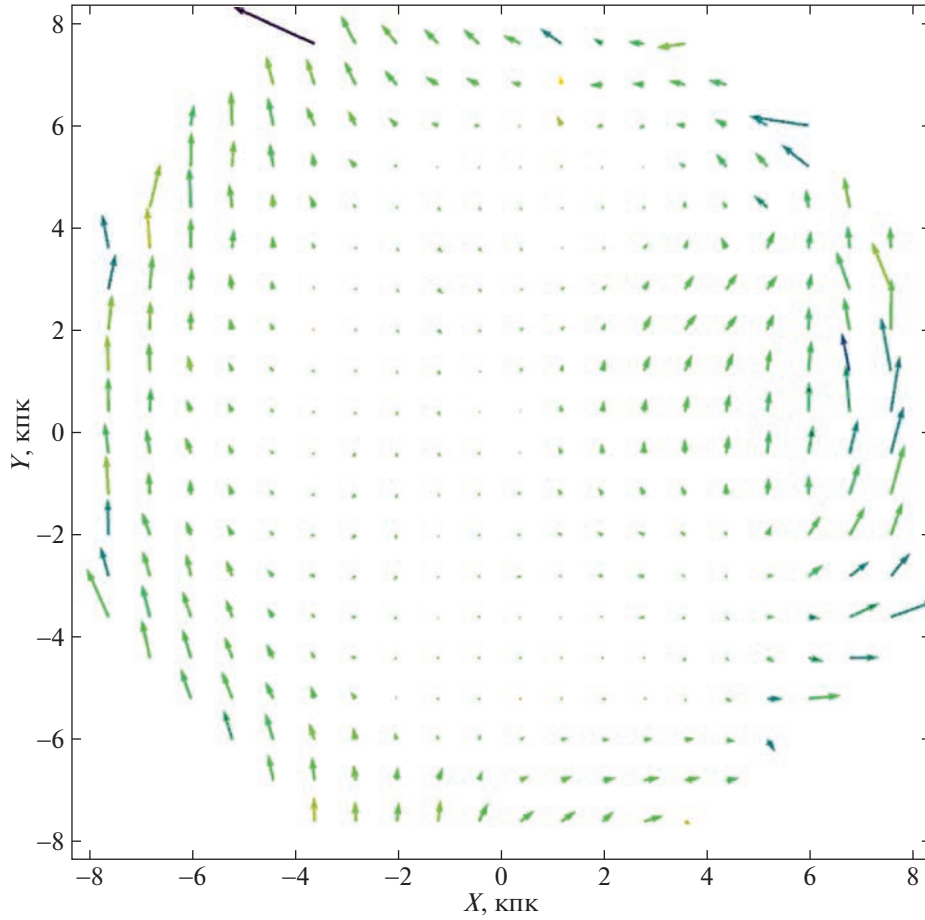


Рис. 7. Остаточные скорости dv'_x , dv'_y , dv'_z звезд с $|z| < 100$ пк в проекции на галактическую плоскость XY . Галактический центр справа. Каждая стрелка соответствует спроецированной усредненной скорости в столбике по оси Z .

$$\begin{aligned} v_y(x, y, z) &= -V + b_x(x, y, z)x + \\ &+ b_y(x, y, z)y + b_z(x, y, z)z, \\ v_z(x, y, z) &= -W + c_x(x, y, z)x + \\ &+ c_y(x, y, z)y + c_z(x, y, z)z, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_x(x, y, z) &= M_{11}(x, y, z), \\ a_y(x, y, z) &= M_{12}(x, y, z) - \omega_z(x, y, z), \\ a_z(x, y, z) &= M_{13}(x, y, z) + \omega_y(x, y, z), \\ b_x(x, y, z) &= M_{12}(x, y, z) + \omega_z(x, y, z), \\ b_y(x, y, z) &= M_{22}(x, y, z), \\ b_z(x, y, z) &= M_{23}(x, y, z) - \omega_z(x, y, z), \\ c_x(x, y, z) &= M_{13}(x, y, z) - \omega_y(x, y, z), \\ c_y(x, y, z) &= M_{23}(x, y, z) + \omega_x(x, y, z), \\ c_z(x, y, z) &= M_{33}(x, y, z). \end{aligned} \quad (7)$$

Для оценки возможных значений этих производных в нуле воспользуемся разложением поля

скоростей в ряд Тейлора (Маклорена). Используя формулу разложения функции от трех переменных $f(x, y, z)$ в ряд Тейлора до второго порядка (8), несложно получить это разложение для функций v_x, v_y, v_z в окрестности нуля (9):

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= f_0 + x \frac{\partial f_0}{\partial x} + y \frac{\partial f_0}{\partial y} + z \frac{\partial f_0}{\partial z} + \\ &+ \frac{x^2}{2} \frac{\partial^2 f_0}{\partial x^2} + \frac{y^2}{2} \frac{\partial^2 f_0}{\partial y^2} + \frac{z^2}{2} \frac{\partial^2 f_0}{\partial z^2} + xy \frac{\partial^2 f_0}{\partial x \partial y} + \\ &+ xz \frac{\partial^2 f_0}{\partial x \partial z} + yz \frac{\partial^2 f_0}{\partial y \partial z} + o(x^2 + y^2 + z^2), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} v_x &= -U + a_x x + a_y y + a_z z + \frac{\partial a_x}{\partial x} x^2 + \\ &+ \frac{\partial a_y}{\partial y} y^2 + \frac{\partial a_z}{\partial z} z^2 + \left(\frac{\partial a_x}{\partial y} + \frac{\partial a_y}{\partial x} \right) xy + \\ &+ \left(\frac{\partial a_x}{\partial z} + \frac{\partial a_z}{\partial x} \right) xz + \left(\frac{\partial a_y}{\partial z} + \frac{\partial a_z}{\partial y} \right) yz, \end{aligned} \quad (9)$$

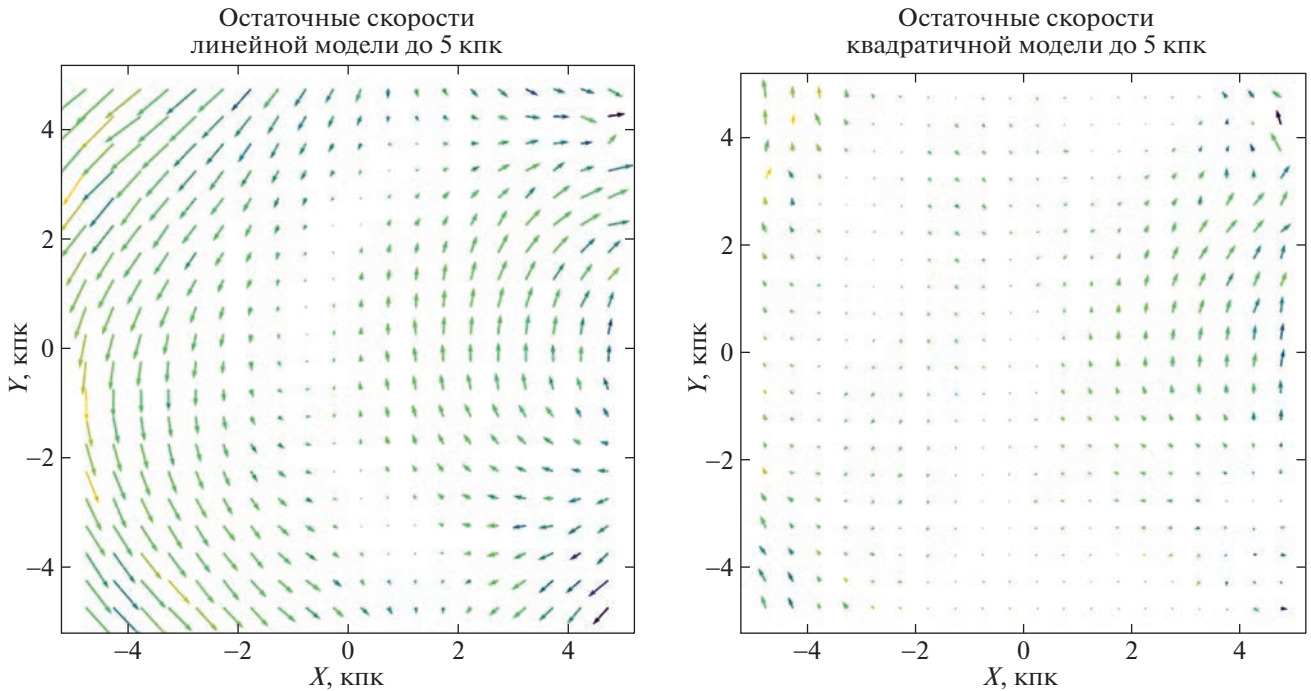


Рис. 8. Наглядное сравнение остаточных скоростей линейной модели dv_x, dv_y, dv_z (слева) с остаточными скоростями квадратичной модели dv'_x, dv'_y, dv'_z (справа) в более крупном масштабе (± 5 кпк). Величины остаточных скоростей приведены в одном масштабе.

$$\begin{aligned}
 v_y &= -V + b_x x + b_y y + b_z z + \frac{\partial b_x}{\partial x} x^2 + \\
 &+ \frac{\partial b_y}{\partial y} y^2 + \frac{\partial b_z}{\partial z} z^2 + \left(\frac{\partial b_x}{\partial y} + \frac{\partial b_y}{\partial x} \right) xy + \\
 &+ \left(\frac{\partial b_x}{\partial z} + \frac{\partial b_z}{\partial x} \right) xz + \left(\frac{\partial b_y}{\partial z} + \frac{\partial b_z}{\partial y} \right) yz, \\
 v_z &= -W + c_x x + c_y y + c_z z + \frac{\partial c_x}{\partial x} x^2 + \\
 &+ \frac{\partial c_y}{\partial y} y^2 + \frac{\partial c_z}{\partial z} z^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial y} + \frac{\partial c_y}{\partial x} \right) xy + \\
 &+ \left(\frac{\partial c_x}{\partial z} + \frac{\partial c_z}{\partial x} \right) xz + \left(\frac{\partial c_y}{\partial z} + \frac{\partial c_z}{\partial y} \right) yz.
 \end{aligned}$$

Здесь для более компактной записи имеется в виду, что значения всех коэффициентов и производных взяты в точке $(0, 0, 0)$:

$$\begin{aligned}
 a_x &= a_x(0, 0, 0), \quad a_y = a_y(0, 0, 0), \quad \dots; \\
 \frac{\partial a_x}{\partial x} &= \frac{\partial a_x}{\partial x}(0, 0, 0), \quad \frac{\partial a_y}{\partial y} = \frac{\partial a_y}{\partial y}(0, 0, 0), \quad \dots
 \end{aligned}$$

Подставив (7) в (9), получаем

$$\begin{aligned}
 v_x &= -U + M_{11}x + (M_{12} - \omega_z)y + \\
 &+ (M_{13} + \omega_y)z + \frac{\partial M_{11}}{\partial x} x^2 +
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial y} - \frac{\partial \omega_z}{\partial y} \right) y^2 + \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right) z^2 + \\
 &+ \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial y} + \frac{\partial M_{12}}{\partial x} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right) xy + \\
 &+ \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial z} + \frac{\partial M_{13}}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial x} \right) xz + \\
 &+ \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial y} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{12}}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) yz, \\
 v_y &= -V + (M_{12} + \omega_x)x + M_{22}y + \\
 &+ (M_{23} - \omega_x)z + \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial x} + \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right) x^2 + \\
 &+ \frac{\partial M_{22}}{\partial y} y^2 + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial z} - \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \right) z^2 + \\
 &+ \left(\frac{\partial M_{22}}{\partial x} + \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial y} \right) xy + \\
 &+ \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{12}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) xz + \\
 &+ \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial y} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \frac{\partial M_{22}}{\partial z} \right) yz, \\
 v_z &= -W + (M_{13} - \omega_y)x + (M_{23} + \omega_x)y + \\
 &+ M_{33}z + \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial x} - \frac{\partial \omega_y}{\partial x} \right) x^2 +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial y} + \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right) y^2 + \frac{\partial M_{33}}{\partial z} z^2 + \\
& + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial x} + \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{13}}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial y} \right) xy + \\
& + \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial x} + \frac{\partial M_{13}}{\partial z} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right) xz + \\
& + \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial y} + \frac{\partial M_{23}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \right) yz.
\end{aligned}$$

Сопоставим табл. 5 и формулу (10) и выпишем значения коэффициентов при квадратичных членах, выделим жирным четыре наиболее значимых коэффициента (табл. 8).

В силу того что квадратичных членов всего 18, а частных производных от параметров модели Огородникова—Милна, входящих в них, — 27, не представляется возможным определить их все независимо. Мы можем получить лишь некоторые их линейные комбинации. Надо сказать, что при определении параметров тензора деформации только лишь по собственным движениям мы сталкиваемся с подобным и при определении параметров стандартной кинематической модели.

Если отойти от формальной математической точки зрения и обратиться к физической картине, то, очевидно, нет необходимости определять все 27 производных. Заметим, что кроме параметров движения Солнца U , V , W , значимыми в модели Огородникова—Милна остаются всего лишь две величины: ω_z и M_{12} (которые известны в более простой модели Оорта—Линдблада как параметры Оорта B и A). Разумно (по крайней мере, на первый раз) ограничиться рассмотрением производных всего лишь от этих величин.

В этом случае из квадратичных коэффициентов возможно однозначно определить следующие значения:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_{12}}{\partial x} &= 0.247 \pm 0.002 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{кпк}^2}, \\
\frac{\partial \omega_z}{\partial x} &= -2.059 \pm 0.002 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{кпк}^2}.
\end{aligned}$$

Значимыми оказываются частные производные параметров Оорта вдоль направления на центр Галактики. Если не учитывать это изменение в линейной модели, эти эффекты проникают в параметр движения Солнца V , приводя к его заметному увеличению при его определении по далеким звездам. Учет квадратичных членов приводит значение параметра V с 30.8 км/с к его обычному значению 21.6 км/с. Адекватность этого расширения стандартной модели можно проиллюстрировать зависимостью скорости звезд (компоненты v_y) на различных расстояниях от центра Галактики. На рис. 9

хорошо видно, что традиционная линейная модель Огородникова—Милна в состоянии описывать движение звезд в области от 0 до 3–4 кпк, в то время как реальные скорости звезд (синяя линия) далеки от линейного закона, квадратичное приближение описывает их значительно лучше. К аналогичным выводам приходят и другие исследователи (см., например, Бобылев, Байкова, 2022).

Следует обратить внимание еще и на значимый коэффициент $\partial M_{23}/\partial z - \partial \omega_x/\partial z$ при z^2 в уравнении для v_y . Это параметр ответственен за нелинейное вертикальное изменение скорости v_y (рис. 10). В работе (Витязев и др., 2012) уже анализировалась асимметрия кинематики звезд северного и южного галактических полушарий, а также рассматривалась модель “слоистого” вращения Галактики.

Значимость показывает также коэффициент $\partial M_{22}/\partial y$ при y^2 , ответственный за изменение компоненты при изменении координаты y .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы линейная и квадратичная звездно-кинематические модели в прямоугольной галактической системе координат. Найдена связь всех коэффициентов со стандартными звездно-кинематическими параметрами и частными производными от них по всем трем направлениям. Показано, что квадратичная модель обладает значительно большей пространственной областью применимости. Получено объяснение поведения значений кинематических параметров линейной модели Огородникова—Милна в зависимости от расстояний используемых звезд. Обнаружено четыре значимых эффекта второго порядка:

- 1) $\frac{\partial M_{12}}{\partial x} = 0.247 \pm 0.002 \frac{\text{км}}{\text{с}} \text{ кпк}^{-2}$ — изменение параметра деформации поля скоростей в плоскости XY (параметр Оорта A) в зависимости от расстояния в направлении на центр—антицентр Галактики;
- 2) $\frac{\partial \omega_z}{\partial x} = -2.059 \pm 0.002 \frac{\text{км}}{\text{с}} \text{ кпк}^{-2}$ — вертикальный градиент угловой скорости вращения совокупности звезд (параметр Оорта B);
- 3) $\frac{\partial M_{22}}{\partial y} = -1.115 \pm 0.001 \frac{\text{км}}{\text{с}} \text{ кпк}^{-2}$ — изменение параметра, ответственного за сжатие—растяжение системы звезд в плоскости XZ в зависимости от расстояния вдоль направления вращения Галактики;
- 4) $\frac{\partial M_{23}}{\partial z} - \frac{\partial \omega_x}{\partial z} = -8.727 \pm 0.006 \frac{\text{км}}{\text{с}} \text{ кпк}^{-2}$ — линейная комбинация неразделяемых параметров,

Таблица 8. Значения линейных комбинаций частных производных параметров модели Огородникова—Милна в нулевой точке. Жирным выделены наиболее значимые коэффициенты

Параметры	Формулы	Значения
a_{xx}	$\frac{\partial M_{11}}{\partial x}$	-0.507 ± 0.004
a_{yy}	$\frac{\partial M_{12}}{\partial y} - \frac{\partial \omega_z}{\partial y}$	0.049 ± 0.001
a_{zz}	$\frac{\partial M_{13}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_y}{\partial z}$	0.065 ± 0.007
a_{xy}	$\frac{\partial M_{11}}{\partial y} + \frac{\partial M_{12}}{\partial x} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x}$	2.306 ± 0.002
a_{xz}	$\frac{\partial M_{11}}{\partial z} + \frac{\partial M_{13}}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial x}$	0.092 ± 0.005
a_{yz}	$\frac{\partial M_{13}}{\partial y} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{12}}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial z}$	-0.122 ± 0.006
b_{xx}	$\frac{\partial M_{12}}{\partial x} + \frac{\partial \omega_z}{\partial x}$	-1.811 ± 0.001
b_{yy}	$\frac{\partial M_{22}}{\partial y}$	-1.115 ± 0.001
b_{zz}	$\frac{\partial M_{23}}{\partial z} - \frac{\partial \omega_x}{\partial z}$	-8.727 ± 0.006
b_{xy}	$\frac{\partial M_{22}}{\partial x} + \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial y}$	0.117 ± 0.002
b_{xz}	$\frac{\partial M_{23}}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{12}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z}$	0.273 ± 0.004
b_{yz}	$\frac{\partial M_{23}}{\partial y} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \frac{\partial M_{22}}{\partial z}$	0.332 ± 0.005
c_{xx}	$\frac{\partial M_{13}}{\partial x} - \frac{\partial \omega_y}{\partial x}$	0.037 ± 0.001
c_{yy}	$\frac{\partial M_{23}}{\partial y} + \frac{\partial \omega_x}{\partial y}$	-0.036 ± 0.001
c_{zz}	$\frac{\partial M_{33}}{\partial z}$	-0.181 ± 0.004
c_{xy}	$\frac{\partial M_{23}}{\partial x} + \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{13}}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial y}$	0.027 ± 0.001
c_{xz}	$\frac{\partial M_{33}}{\partial x} + \frac{\partial M_{13}}{\partial z} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z}$	0.060 ± 0.003
c_{yz}	$\frac{\partial M_{33}}{\partial y} + \frac{\partial M_{23}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_x}{\partial z}$	0.312 ± 0.004
		км/с · кпк ⁻²

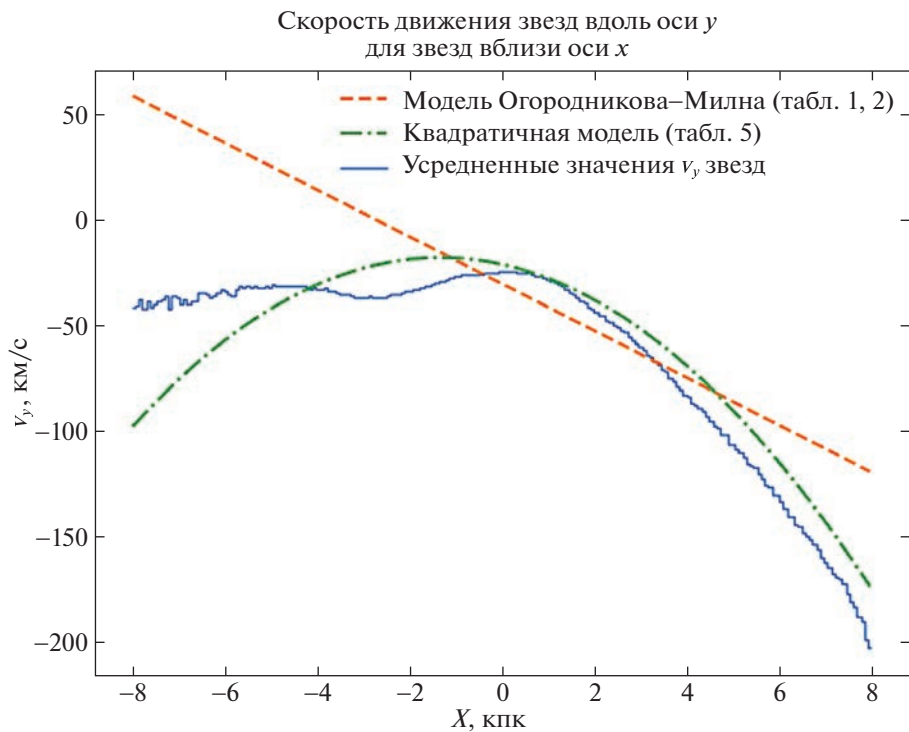


Рис. 9. Изменение компоненты в скоростях движения звезд вдоль оси X (направленной на центр Галактики). Усреднение проводилось для звезд с $|y| < 10$ кпк, $|z| < 10$ кпк. На графике изображены теоретические значения скорости, полученной исходя из модели Огородникова–Милна и квадратичной модели.

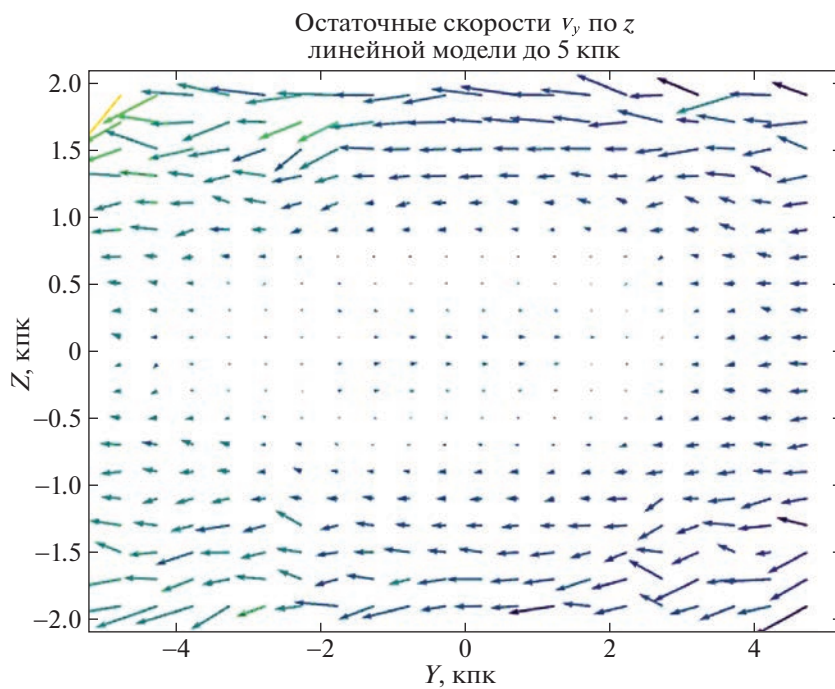


Рис. 10. Остаточные скорости линейной модели dv_x , dv_y , dv_z звезд с $|x| < 100$ пк в проекции на YZ (нормальная к направлению на центр Галактики).

разность вертикального градиента скорости вращения вдоль оси, направленной на центр Галактики и деформации поля скоростей в плоскости YZ .

Авторы выражают благодарность консорциуму Gaia за предоставленные данные каталога Gaia DR3.

Авторы благодарят анонимных рецензентов, чьи ценные замечания позволили улучшить качество статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ESA Gaia: <https://sci.esa.int/web/gaia>
2. Gaia, EDR3: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>
3. Gaia Collaboration, *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021).
4. Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, and R. Andrae), *Astron. J.* **161**, 147B (2021).
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Лебедева С.В., Письма в Астрон. журн. **33**, 809 (2007) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, S.V. Lebedeva, *Astron. Lett.* **33**, 720 (2007)].
6. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **40**, 830 (2014) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **40**, 773 (2014)].
7. Бобылев В.В., Байкова А.Т., *Астрон. журн.* **99**, 267 (2022).
8. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *Res. Astron. Astrophys.* **23**, 045001 (2023).
9. Браун и др. (A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevey, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 1G (2021).
10. Витязев (V.V. Vityzev), *Proc. of the JOURNEES 2000*, Paris, p. 121–122 (2000).
11. Витязев, Цветков (V.V. Vityzev and A.S. Tsvetkov), *Astron. Nachr.* **334**, 760 (2013).
12. Витязев и др. (V.V. Vityzev, A.S. Tsvetkov, V.V. Bobylev, and A.T. Bajkova), *Astrophysics* **60**, 503 (2017).
13. Витязев В.В. и др., Письма в Астрон. журн. **44**, 265 (2018) [V.V. Vityzev, et al., *Astron. Lett.* **44**, 236 (2018)].
14. Захариас и др. (N. Zacharias, C.T. Finch, T.M. Girard, A. Henden, J.L. Bartlett, D.G. Monet, and M.I. Zacharias), *Astron. J.* **145**, 44 (2013).
15. Клубе (S.V.M. Clube), *MNRAS* **159**, 289 (1972).
16. Линдبلاد (B. Lindblad), *Arkiv Math. Astron. Fys.* **20**, A, 17, 1 (1927).
17. Огородников К.Ф., *Динамика звездных систем* (М.: Физматгиз, 1958).
18. Оорт (J.H. Oort), *Bull. Astron. Netherl.* **3**, 275 (1927).
19. Перриман и др. (M.A.C. Perryman, et al.), *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, V. 1–17, ESA (1997).
20. Рёзер (S. Roeser, M. Demleitner, and E. Schilbach), *Astron. J.* **139**, 2440 (2010).
21. Рыбка С.П., *Кинемат. и физ. небесн. тел* **20**, 437 (2004).
22. Федоров и др. (P.N. Fedorov, A.A. Myznikov, and V.S. Akhmetov), *MNRAS* **393**, 133 (2009).
23. Фрикке (W. Fricke), *Veroff. Astron. Rechen-Inst. Heidelberg N 28*, p. 1–52 (1977).
24. Цветков (A.S. Tsvetkov), *Astron. Astrophys. Transact.* **9**, 1 (1995).
25. Цветков (A.S. Tsvetkov), *Proc. of the IV Intern. Workshop on Posit. Astron. Celest. Mech.*, Univ. de Valencia, Spain, P. 73–80 (1998).
26. Цветков А.С., Письма в Астрон. журн. **47**, P. 900 (2021) [A.S. Tsvetkov, *Astron. Lett.* **47**, 863 (2021)].
27. Цветков А.С., Амосов Ф.А., Письма в Астрон. журн. **45**, 517 (2019) [A.S. Tsvetkov, *Astron. Lett.* **45**, 462 (2019)].
28. Шацова Р.Б., *Ученые записки ЛГУ*, 136 (1950).

АЗИМУТАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПЛАНЕТЕЗИМАЛЬНЫХ ОКОЛОЗВЕЗДНЫХ ДИСКАХ

© 2023 г. Т. В. Демидова^{1,2*}, И. И. Шевченко^{2,3}

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 25.05.2023 г.

После доработки 05.07.2023 г.; принята к публикации 07.07.2023 г.

Рассмотрены пути формирования азимутальных резонансных структур в околозвездных планетезимальных дисках с планетами. Путем аналитических оценок и массовых численных экспериментов показано, что частицы диска, исходно попадающие в области резонансов средних движений низких порядков с планетой, со временем могут концентрироваться в потенциально наблюдаемые азимутальные структуры. Процесс структурирования протекает быстро, обычно он занимает время ~ 100 орбитальных периодов планеты. Найдено, что относительное количество частиц, сохраняющих свое резонансное положение, растет с уменьшением массового параметра μ (отношения масс возмущающей планеты и родительской звезды), но всегда имеет место удаление существенной доли частиц из диска за счет их аккреции на звезду и планету, а также перехода на сильно вытянутые и гиперболические орбиты. Построены ожидаемые радиоизображения азимутально структурированных дисков. В рассмотренных нами моделях наиболее четко проявились азимутальные структуры, ассоциированные с резонансами $2 : 1$ и $3 : 2$; вероятны также наблюдательные проявления резонансов $1 : 2$ и $2 : 3$.

Ключевые слова: резонансы средних движений, осколочные диски, планетезимальные диски, динамический хаос, планетезимали.

DOI: 10.31857/S0320010823060025, EDN: GNPSFO

ВВЕДЕНИЕ

Присутствие планеты (планет) в остаточном планетезимальном диске оказывает существенное влияние на распределение вещества в диске. Резонансы средних движений с планетой формируют внутри диска кольцеобразные сгущения и полости, свободные от вещества (Озерной и др., 2000; Квиллен, Торндайк, 2002; Кюхнер, Хольман, 2003; Квиллен, Фабер, 2006; Мустилл, Ваят, 2012; Моррисон, Мальхотра, 2015; Демидова, Шевченко, 2016). Возмущения со стороны планет могут формировать границы диска, как внешние, так и внутренние, в зависимости от конфигурации системы (Ваят и др., 1999; Квиллен, 2006; Су и др., 2013; Родигас и др., 2014).

Планетезимальный (осколочный) околозвездный диск образуется вместе с планетной системой звезды в результате эволюции протопланетного газо-пылевого диска (см., например, обзор Марино, 2022). Осколочный диск состоит из твердых

тел с размерами в широком диапазоне: от мелкой микронной пыли до километровых и больших планетезималей.

Ранее мы рассматривали формирование спиральных и кольцевых структур в осколочных дисках (Демидова, Шевченко, 2015, 2016). Здесь мы исследуем *азимутальное* структурирование планеты вещества осколочного диска, попадающего в окрестности резонансов средних движений (средних частот обращения тел на орбитах) с планетой (Мюррей, Дермотт, 2000; Шевченко, 2020). Мы обсуждаем резонансы первого порядка, конкретно $2 : 1$, $3 : 2$, $1 : 2$, $2 : 3$.

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ АЗИМУТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Отметим, что согласно работе Кондратьева (2014) распределение поверхностной плотности в диске вокруг гравитирующего тела, который состоит из множества кеплеровых орбит, может иметь максимумы вблизи внутренней и внешней границ диска. Появление максимума плотности на

*Электронный адрес: proximal@list.ru

внутренней границе обусловлено сгущением орбит вблизи перицентров. Подобное сгущение плотности видно в начальном распределении частиц на рис. 1. Максимум вблизи апоцентра обусловлен динамикой частиц, поэтому не проявляется в начальном распределении частиц.

Как известно, скорость тела, обращающегося на эллиптической орбите, максимальна в перицентре его орбиты и минимальна в апоцентре. Значения скорости соответственно равны

$$v_p = na\sqrt{\frac{1+e}{1-e}}, \quad v_a = na\sqrt{\frac{1-e}{1+e}}, \quad (1)$$

где n — среднее движение, a — большая полуось орбиты, e — эксцентриситет (см., например, формулы (2.35) в книге Мюррея, Дермотта, 2000). Таким образом, отношение максимальной скорости к минимальной составляет

$$v_p/v_a = \frac{1+e}{1-e}, \quad (2)$$

а отношение времени пребывания частицы в окрестностях апоцентра и перицентра составит

$$T_a/T_p \approx \frac{1+e}{1-e}, \quad (3)$$

что стремится к бесконечности при $e \rightarrow 1$.

Планетные возмущения влияют на распределение поверхностной плотности частиц. Как показали наши расчеты, область вблизи внутренней границы диска расширяется от вещества.

Таким образом, внешний наблюдатель ансамбля частиц на вытянутых орбитах будет видеть частицы, сконцентрированные в основном к апоцентрам. На этом простом факте, как мы убедимся далее, основывается потенциальная возможность наблюдательного проявления азимутальных структур.

Далее мы предполагаем, что взаимные возмущения частиц на орбитах отсутствуют.

Рассмотрим траектории частиц в различных резонансах во вращающейся (с угловой скоростью возмущающей планеты) системе координат. Орбита планеты полагается круговой. Рассмотрим внутренние и внешние резонансы первого порядка.

Если частица находится во внутреннем резонансе $p+q:p$ с планетой, то конфигурация “звезда—планета—частица” повторяется через каждые $p+q$ орбитальных периодов частицы; если частица находится во внешнем резонансе $p:p+q$ — то через каждые p орбитальных периодов частицы (Мюррей, Дермотт, 2000).

В книге Мюррея, Дермотта (2000) показаны траектории частиц в некоторых резонансах первого порядка с периодом планеты (см. рис. 8.4 в данной книге). Во вращающейся (с угловой скоростью

планеты) системе координат особенностью траекторий частиц являются петли, которые возникают вблизи либо апоцентра (для внутренней частицы), либо перицентра (для внешней частицы).

Чтобы конфигурация “звезда—планета—частица” в очередной раз повторилась, при внутреннем резонансе $p+q:p$ требуется $p+q$ орбитальных оборотов частицы, а при внешнем резонансе $p:p+q$ — p оборотов; поэтому число петель траектории равно $p+q$ и p соответственно.

Угловая скорость планеты на круговой орбите постоянна, а скорость частицы на эллиптической орбите варьируется со временем. Если, начиная с нуля, увеличивать эксцентриситет орбиты внутренней частицы, то при некотором критическом значении эксцентриситета угловая скорость частицы в апоцентре совпадет с постоянной угловой скоростью планеты; на траектории частицы во вращающейся системе координат появится «точка заострения (возврата)». Если увеличивать эксцентриситет далее, то траектория частицы образует обратную петлю.

Нетрудно показать (см. Мюррей, Дермотт, 2000), что для внутренней частицы в резонансе $p+q:p$ с планетой точки возврата возникают при значении e , удовлетворяющему кубическому уравнению

$$(1+e)^3 = \left(\frac{p+q}{p}\right)^2(1-e), \quad (4)$$

а для внешней частицы в резонансе $p:p+q$ с планетой — при значении e' , удовлетворяющему кубическому уравнению

$$(1-e')^3 = \left(\frac{p}{p+q}\right)^2(1+e'). \quad (5)$$

Например, решение уравнения (4) для частиц во внутренних резонансах $2:1$, $3:2$ и $4:3$ дает критические значения e , соответственно равные 0.365, 0.211 и 0.148 (Мюррей, Дермотт, 2000).

В соответствии с формулой (3), наибольшего контраста в наблюдаемых апоцентрических и перицентрических концентрациях частиц следует ожидать в первом из этих случаев (резонанс $2:1$), наименьшего — в третьем (резонанс $4:3$).

В Солнечной системе реальным примером резонансной группы, формирующей слабо выраженную квазитреугольную вращающуюся (с угловой скоростью обращения Юпитера) структуру в главном поясе астероидов, является группа Гильды (Львов и др., 2004), пребывающая в резонансе $3:2$ с Юпитером.

МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ

Рассмотрим динамику системы в плоской задаче в барицентрической системе координат. Пусть система включает звезду массой $M = M_\odot$, планету массой m на круговой орбите с периодом P и большой полуосью a и диск из пассивно гравитирующих частиц, параметры которого будут конкретизированы далее.

В начальный момент времени звезда находится в точке с координатами $(x, y) = (p_1, 0)$, а планета — в точке $(p_2, 0)$, где

$$p_1 = -\frac{m}{M+m}a \quad \text{и} \quad p_2 = \frac{M}{M+m}a.$$

Векторы скорости звезды и планеты исходно имеют компоненты

$$\left(0, -\frac{m}{M+m}na\right) \quad \text{и} \quad \left(0, \frac{M}{M+m}na\right)$$

соответственно, где среднее движение $n = 2\pi/P$. Варьируется массовый параметр $\mu = m/(M+m)$, динамика системы рассмотрена при четырех его значениях: $\lg \mu = -2, -3, -4$ и -5 .

В начальный момент времени 10^6 безмассовых (пассивно гравитирующих) частиц размещаются вблизи заданного резонанса. В работе Демидовой и Шевченко (2020) оценены радиальные размеры кольцевых хаотических зон для резонансов средних движений в зависимости от массового параметра: $\Delta a_r = 0.91\mu^{0.43}a$ для внутренних (относительно орбиты планеты) резонансов, $\Delta a_r = 1.32\mu^{0.42}a$ для внешних. Данные значения Δa_r использованы при определении границ для начальных значений больших полуосей орбит частиц: частицы исходно распределялись случайным образом по большой полуоси в пределах $a_r \pm \Delta a_r/2$, где a_r — положение резонанса. Такой выбор границ обусловлен тем, что частицы эффективно выбрасываются из хаотической области (где со временем их концентрация снижается, см. Демидова и Шевченко, 2020) и, таким образом, могут участвовать в формировании структур.

Существуют и космогонические основания для такого выбора: если какая-либо планета в диске исходно формировалась вблизи резонанса с кругой планетой и в результате столкновений с крупными объектами — планетными эмбрионами — была разрушена (о столкновительной эволюции при формировании планетных систем см. Агнор и др., 1999; Чемберс, Уэтерилл, 1998; Тэйлор, 1998), это способствовало бы повышению концентрации планетезималей именно в резонансной области.

Расчеты выполнены для четырех резонансов средних движений частица—планета: двух внешних ($1:2$ и $2:3$) и двух внутренних ($2:1$ и $3:2$). Эксцентриситеты орбиты частиц задаются случайным

образом в диапазоне $[0:1)$, истинная аномалия и долгота перицентра также распределены случайным образом в пределах $[0, 2\pi)$.

Расчеты выполнены в плоской задаче в прямоугольной барицентрической инерциальной системе координат. Планета и частицы обращаются на орбитах против часовой стрелки. Интегрирование уравнений движения частиц проведено с использованием алгоритма Булирша—Штера (Штер, Булирш, 1980; Пресс и др., 1992). Допустимая относительная погрешность ϵ установлена равной 10^{-14} . В процессе расчетов осуществлялся контроль постоянства интеграла Якоби для каждой частицы. Реализация метода детально описана в работе Демидовой (2022).

Частицы диска могут покидать систему за счет трех базовых процессов: аккреции на планету, аккреции на звезду и рассеяния на удаленную орбиту. Задавался аккреционный радиус звезды $R_{sa} = 0.01(M/(3m))^{1/3}a$ и планеты $R_{pa} = 0.01(m/(3M))^{1/3}a$. Частицы, подходящие к массивному телу на расстояние меньше соответствующего аккреционного радиуса, считались аккрецирующими на объект и удалялись из системы. Частицы, удалявшиеся от барицентра на расстояние более чем 4 орбитальных радиуса планеты, также считались покинувшими систему. Максимальная продолжительность интегрирования орбиты одной частицы составляла 10^5 орбитальных периодов планеты.

В данной задаче не учитывалась самогравитация планетезималей. Бе и др. (2014), Пирс, Ваят (2014) показали, что влияние массивной планеты доминирует над взаимным гравитационным взаимодействием (самогравитацией) планетезималей, если масса планеты на порядок или более превосходит массу диска. Минимальная масса, которую мы рассмотрели в данной работе, равна $10^{-5}M_\odot$ (~ 3 массы Земли), при этом рассматривается узкое кольцо вблизи резонанса планеты. Данная масса на порядок больше массы пояса Койпера и на несколько порядков больше массы Главного пояса астероидов (Питиева, Питиев, 2018а,б). Поэтому мы полагаем, что самогравитацией частиц диска можно пренебречь.

ДИНАМИКА ЧАСТИЦ

Поскольку распределение частиц и скорости процессов удаления их из системы в целом аналогично для всех рассмотренных значений μ , далее (если не указано иное) будет детально описан случай $\lg \mu = -3$.

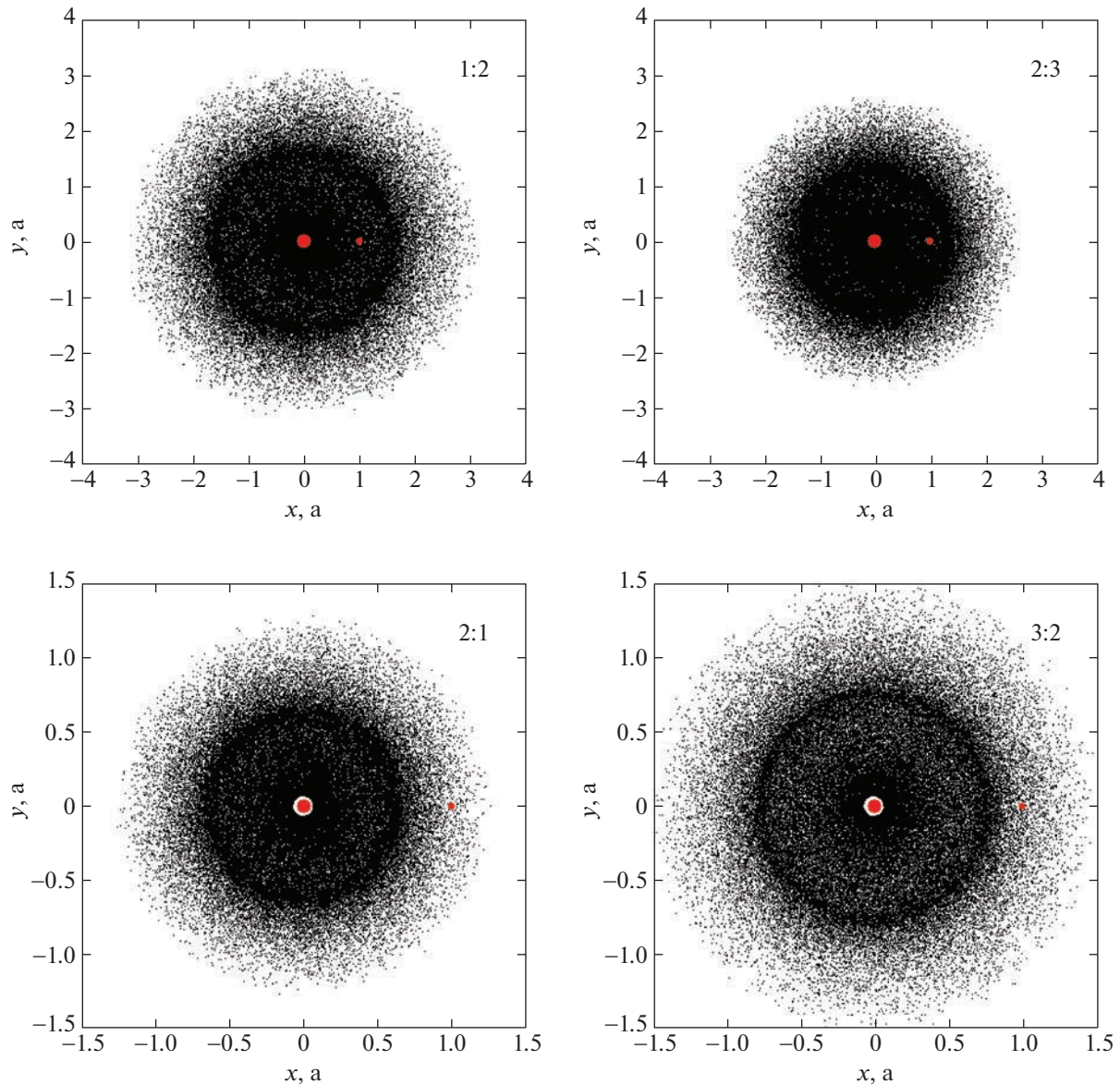


Рис. 1. Начальное распределение частиц при резонансах средних движений 1 : 2, 2 : 3, 2 : 1 и 3 : 2, в модели с массовым параметром $\lg \mu = -3$. Положения звезды и планеты обозначены красными кружками. Координаты по осям даны в единицах большой полуоси орбиты планеты.

Распределение частиц

На рис. 1 показано начальное распределение частиц в каждой модели. Исходно вещество сконцентрировано в кольце вблизи положения соответствующего резонанса.

Планетные возмущения приводят к возникновению азимутальных структур в распределении частиц. На рис. 2 показано распределение частиц на момент окончания моделирования, время $t = 10^5 P$ (где P — орбитальный период планеты). В случае резонанса 1 : 2 (рис. 2 сверху слева) плотное кольцо вблизи положения резонанса $R \approx 1.58a$ (где a — орбитальный радиус планеты) сохраняется, но кольцообразная структура уже асимметрична:

появляется сгущение частиц за планетой вблизи положительной части оси x . Область внутри кольца становится разреженной. Заметны асимметричные области пониженной плотности частиц вблизи звезды и планеты. Кроме того, проявляется дугообразная область пониженной плотности вблизи $R = 2.4a$ (вблизи резонанса 2 : 7), расположенная симметрично относительно отрицательной части оси x ; внешний край диска асимметричен.

При исходном распределении частиц вблизи резонанса 2 : 3 (рис. 2 сверху справа) получающаяся кольцообразная структура имеет два симметричных сгущения частиц вдоль оси y . Кроме того, вблизи оси y имеются две дугообразные области

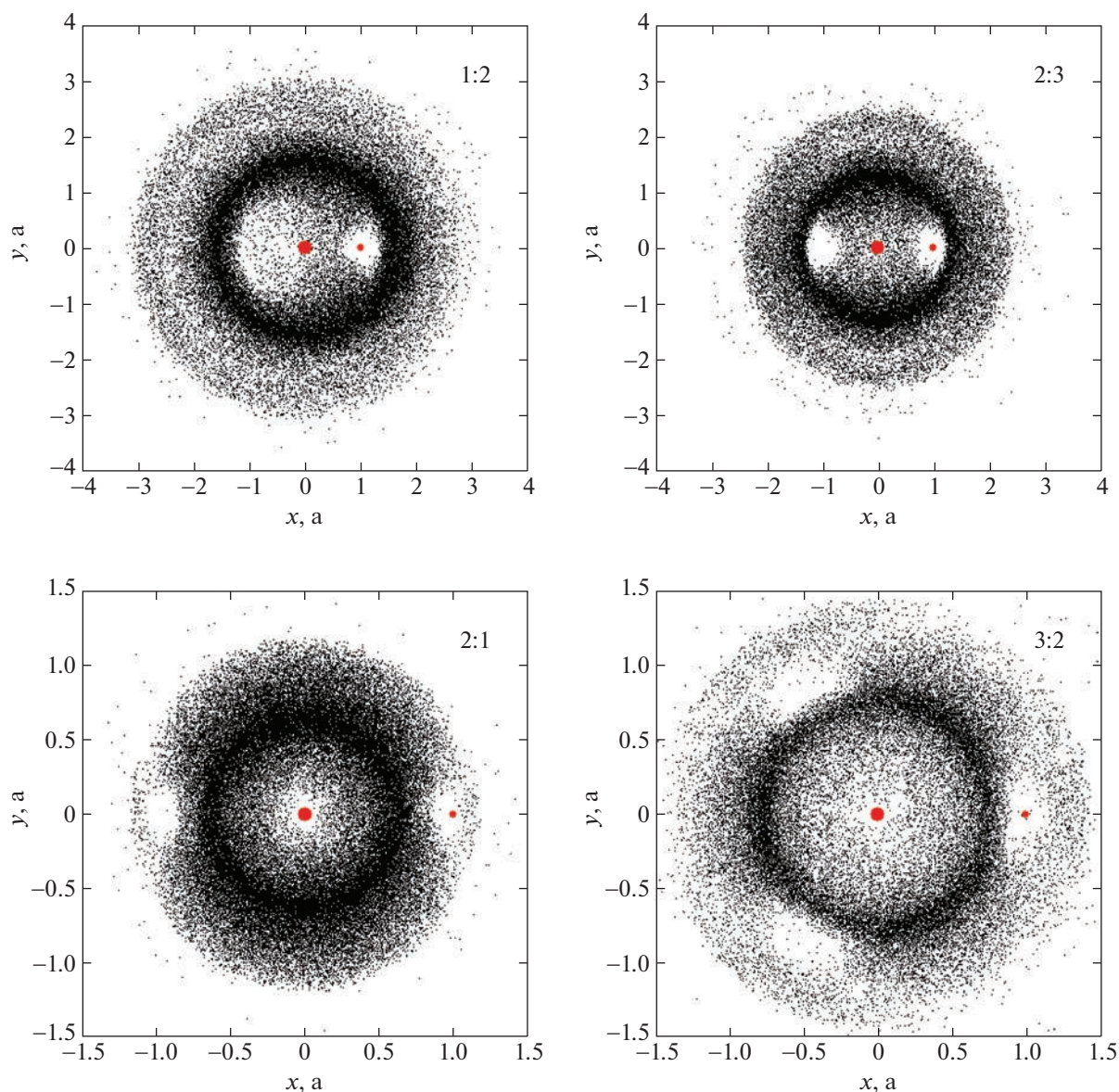


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но на момент времени $t = 10^5 P$.

с пониженной плотностью при $R \approx 2.08a$, что соответствует резонансу $1 : 3$. Во внутренней (относительно положения резонанса) области вещество разрежено, и проявляются две симметричные полости вблизи положения планеты и на противоположной части оси x .

Вблизи положения резонанса $2 : 1$ (рис. 2 внизу справа) сохраняется симметричное кольцо. Область около звезды разрежена. Кроме того, наблюдаются полости вблизи положения планеты, а также симметричная ей на противоположной части оси x , как и для случая $2 : 3$.

Наиболее интересная азимутальная структура проявляется в случае, когда вещество исходно распределено вблизи резонанса $3 : 2$. Структура имеет три сгущения вещества; также образуются

и полости: одна из них окружает планету, а две другие смещены относительно планеты на $\pm 120^\circ$ по азимуту. Область вблизи звезды также разрежена, как и в предыдущих случаях.

Расчеты показали, что диск становится структурированным за время $\sim 100P$, а затем картина уже мало меняется со временем.

Частицы, покидающие систему

Зависимости количества покидающих систему частиц от времени проявляются одинаковым образом во всех трех базовых процессах ухода: вначале наблюдается резкий рост количества уходящих частиц, а затем зависимость выходит на плато. При этом, как в процессе аккреции на планету,

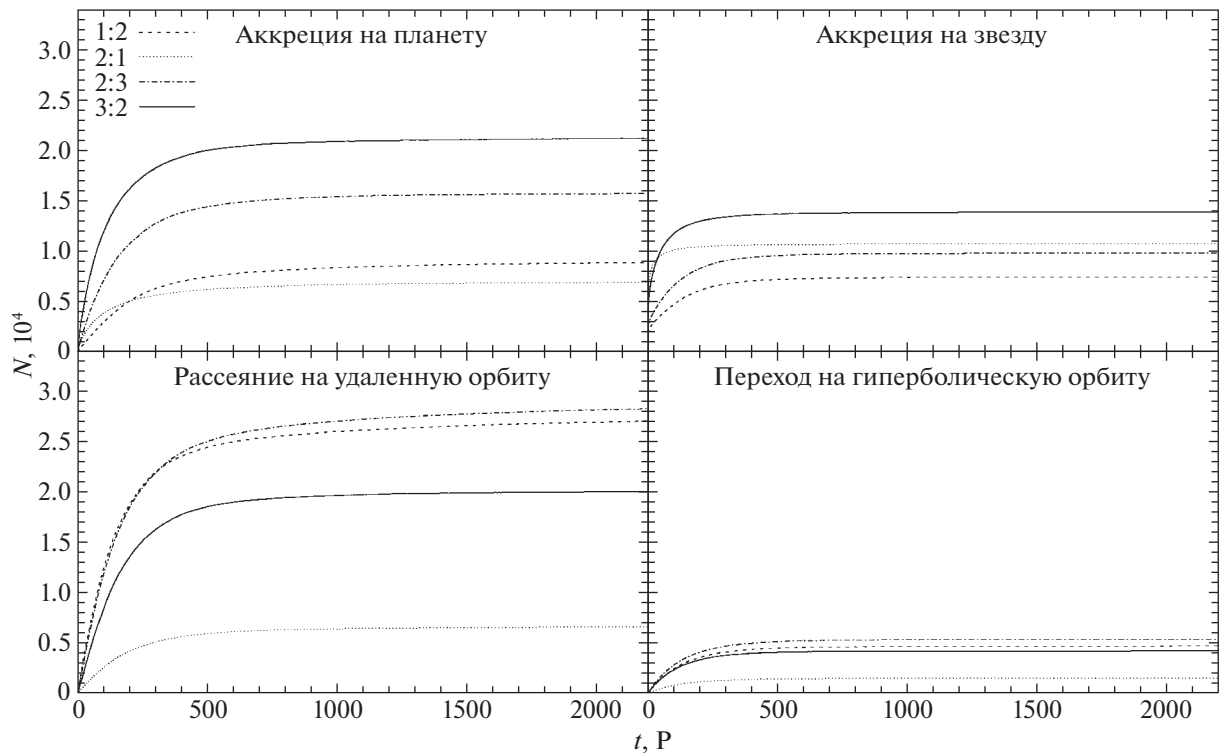


Рис. 3. Количество N частиц, покидающих систему с течением времени t : за счет аккреции на планету (вверху слева), аккреции на звезду (вверху справа), рассеяния на удаленные орбиты (внизу слева), перехода на гиперболическую орбиту (внизу справа); все в модели с массовым параметром $\lg \mu = -3$. Частицам с начальным распределением в области резонанса 1 : 2 соответствует штриховая линия, 2 : 1 — пунктирная линия, 2 : 3 — штрихпунктирная линия, 3 : 2 — сплошная линия. Количество частиц указано в 10^4 штук, а время — в орбитальных периодах планеты.

так и в процессе рассеяния на удаленную орбиту, выход на плато происходит через $\sim 400P$, а в случае аккреции на звезду и перехода на гиперболическую орбиту — через $\sim 200P$. Таким образом, в эффективности удаления частиц из системы существенно доминируют первые два процесса.

На планету большее количество частиц аккрецирует из областей резонансов 3 : 2 и 2 : 3, поскольку эти резонансы расположены ближе к орбите планеты. При этом существенно чаще выпадают на планету частицы из внутреннего резонанса 3 : 2, чем из внешнего 2 : 3. Частицы, исходно расположенные вблизи резонансов 1 : 2 и 2 : 1, дают примерно одинаковый вклад в аккрецию на планету (рис. 3 вверху слева).

В процессе аккреции на звезду доминируют частицы из внутренних резонансов, однако для резонансов 2 : 1 и 2 : 3 различия невелики. Здесь, как и в случае аккреции на планету, доминируют частицы из резонанса 3 : 2 (рис. 3 вверху справа).

В процессе рассеяния на удаленную орбиту участвует заметно большее число частиц, расположенных исходно вблизи внешних резонансов, как и следовало ожидать. Зависимости для случаев

резонансов 1 : 2 и 2 : 3 весьма схожи. Также существенный вклад в процесс рассеяния дают частицы из области резонанса 3 : 2 (рис. 3 внизу слева).

Примерно 10% частиц, вышедших на пределы $R = 4a$, являются перешедшими на гиперболические орбиты и могут считаться выброшенными из системы. Частицы из областей резонансов 1 : 2, 2 : 3 и 3 : 2 дают практически одинаковый вклад в этот процесс, тогда как в случае резонанса 2 : 1 относительное количество уходящих на гиперболические орбиты частиц существенно меньше (см. рис. 3 внизу справа).

На рис. 4 представлено количество частиц, покинувших расчетную область во всех моделях на момент окончания расчетов. Видно, что количество частиц как аккрецирующих на планету, так и рассеивающихся на удаленные орбиты и переходящих на гиперболические орбиты, растет с увеличением массового параметра μ . При этом в случае аккреции на звезду наблюдается обратная зависимость, характер которой, по всей видимости, определяется ростом количества частиц, уходящих из расчетной области другими способами. При этом относительное количество покинувших расчетную область частиц в каждом процессе совпадает с представленным выше на рис. 3. Отметим, что

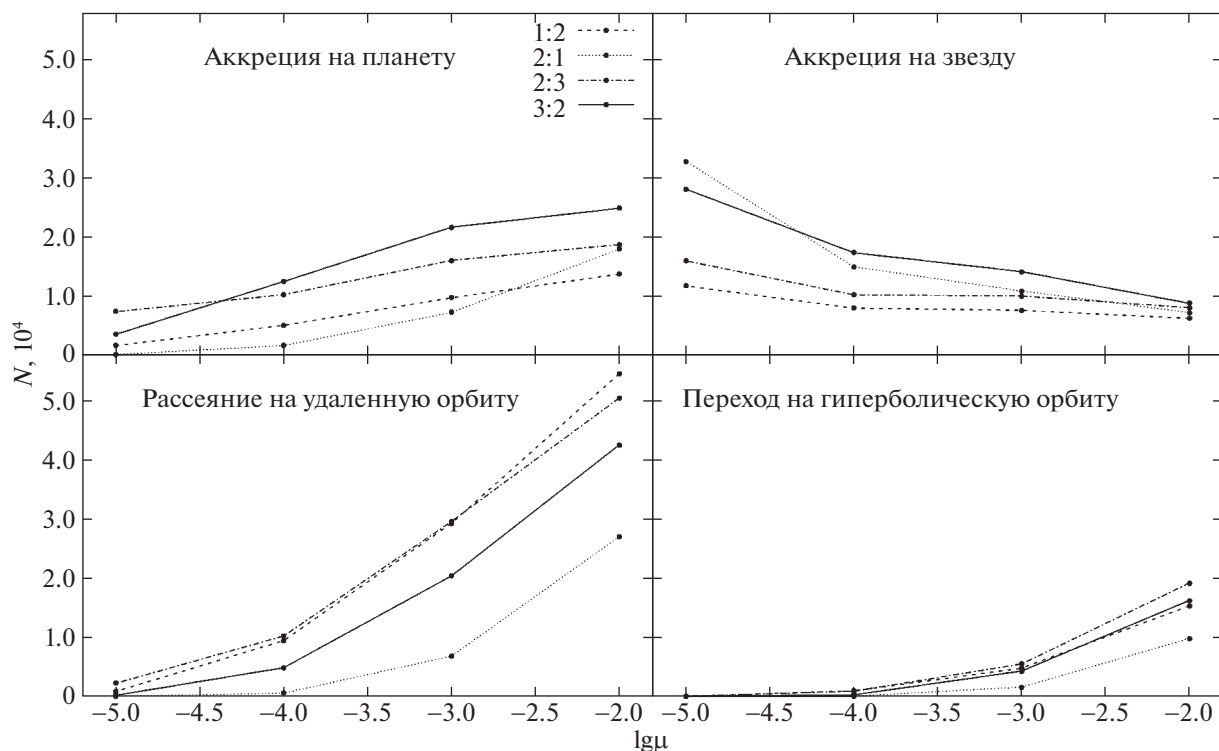


Рис. 4. Количество N частиц, покинувших систему на момент времени $t = 10^5 P$, в зависимости от логарифма массового параметра $\lg \mu$: за счет аккреции на планету (вверху слева), аккреции на звезду (вверху справа), рассеяния на удаленные орбиты (внизу слева), перехода на гиперболическую орбиту (внизу справа). Частицам с начальным распределением в области резонанса 1 : 2 соответствует штриховая линия, 2 : 1 — пунктирная линия, 2 : 3 — штрихпунктирная линия, 3 : 2 — сплошная линия. Количество частиц указано в 10^4 штук.

при минимальном взятом нами значении массового параметра $\lg \mu = -5$ частицы не переходят на гиперболические орбиты во всех рассмотренных случаях резонансов.

НАБЛЮДАЕМОСТЬ АЗИМУТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Наиболее интересная структура финального распределения частиц получилась при их исходном распределении в области резонанса 3 : 2. На рис. 5 показано финальное распределение частиц в четырех моделях с разными значениями массового параметра μ . Видно, что при $\lg \mu = -2$ получающаяся структура сильно размыта, а при $\lg \mu = -3$ она проявляется четко как квазиправильная. С уменьшением μ области повышенной плотности частиц расширяются по азимуту, а размеры полостей уменьшаются. Поэтому далее мы рассматриваем возможность реального наблюдения такой структуры в модели с $\lg \mu = -3$.

Расчет теоретических изображений

Размеры частиц в планетезимальных дисках варьируются от десятков микрон до сотен километров

(Ваят, 2008; Кривов, 2010). Распределение частиц по размерам регулируется процессом разрушительных столкновений планетезималей, при этом мелкая пыль (< 10 мкм) удаляется из диска за счет давления излучения (Кривов, 2000). Столкновительная динамика планетезималей исследовалась в ряде работ (Доминик, Дечин, 2003; Кривов и др., 2006; Ваят и др., 2007; Тебо, Ожеро, 2007; Лене и др., 2008; Гаспар и др., 2012). В частности, было показано, что столкновительная эволюция частиц приводит к их распределению по размерам вида $dN = D^{2-3q}dD$ (где индекс $q = 5/3 - 2$); соответственно, распределение по массе имеет вид $dN = m^{-q}dm$. Обычно при моделировании выбирают $q = 11/6$:

$$dN = D^{-3.5}dD, \quad (6)$$

что объясняется в модели бесконечного столкновительного каскада (Донахи, 1969).

Тогда массовая доля частиц размера D зависит от него следующим образом: $dm \propto D^{-0.5}dD$. Проинтегрировав данное соотношение по D , можно показать, что для объектов размерами от 100 км до 1 км общий вклад в массу планетезимального диска составляет $\sim 90\%$. Однако тепловое излучение в субмиллиметровом диапазоне, которое может быть

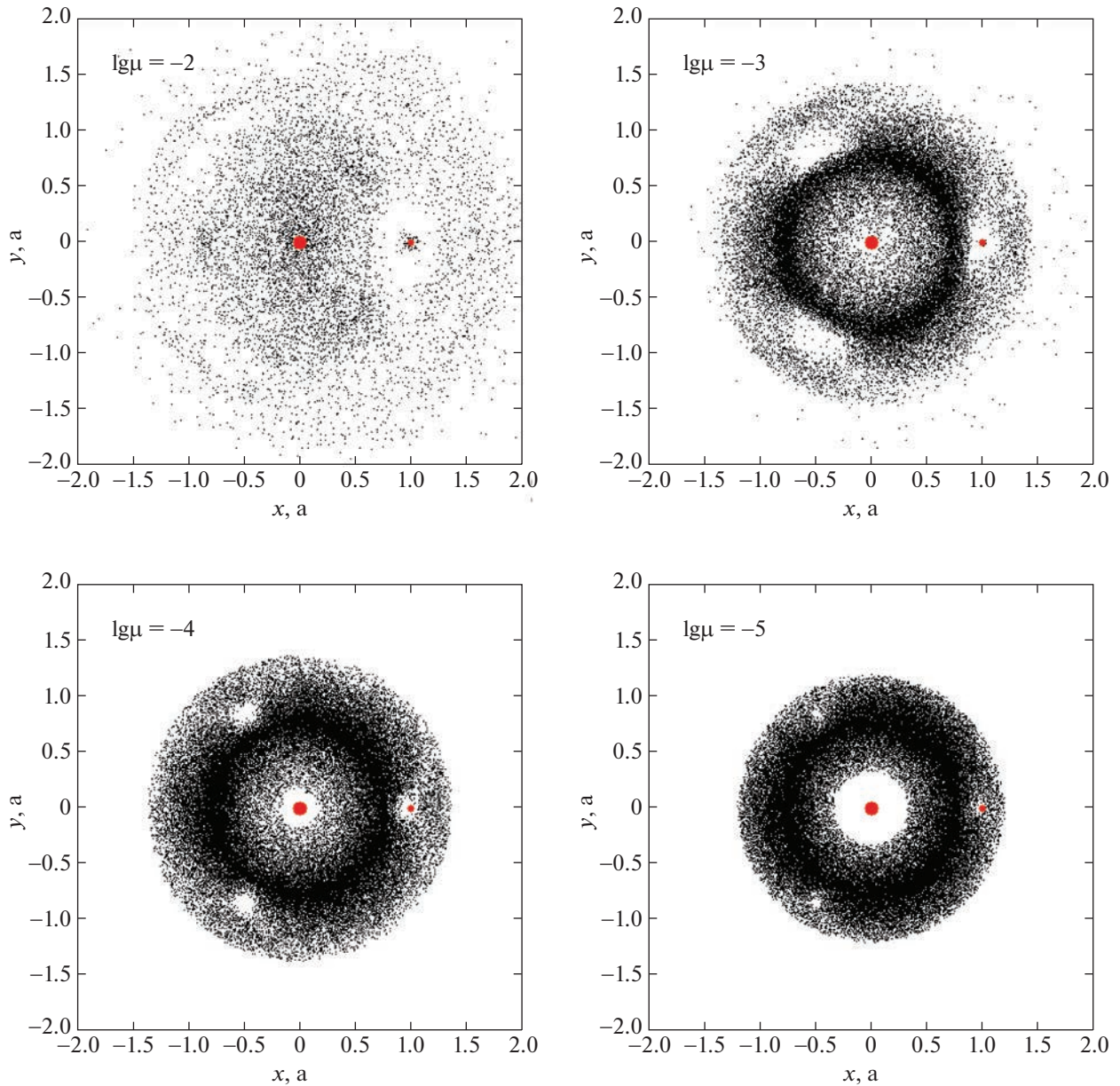


Рис. 5. То же, что и на рис. 2, но для резонанса 3 : 2; в моделях с массовым параметром $\lg \mu = -2$ (вверху слева), $\lg \mu = -3$ (вверху справа), $\lg \mu = -4$ (внизу слева), $\lg \mu = -5$ (внизу справа).

зарегистрировано комплексом ALMA, испускают частицы 0.1–10 мм (Марино, 2022).

В работах Гривза (2005), Тебо, Ожеро (2007) приведены оценки массы пылевой ($D \leq 1$ см) компоненты в типичном осколочном диске: $M_{\text{dust}} = 0.001 - 0.1 M_{\oplus}$. В наших расчетах излучения частиц осколочного диска, расположенных в области резонанса, масса мелкой пыли M_{dust} выступает в качестве параметра задачи. Рассматривается три сорта частиц с размерами 100 мкм, 1 мм и 1 см. Масса M_{dust} распределена между ними в соответствии с законом (6). Масса одной расчетной частицы каждого сорта определяется следующим

образом: $m_D = (M_{\text{dust}}/N_{\text{tot}})f_D$, где N_{tot} — общее число частиц в диске на момент времени $10^5 P$, а f_D — относительная доля частиц размера D .

В расчетах динамики частиц нами рассматривается плоская (двумерная) задача; соответственно, в расчетах излучения каждой частице случайным образом присваивается значение координаты z в диапазоне $[-0.005 \text{ а.е.} : 0.005 \text{ а.е.}]$. Наши расчеты показали, что выбор диапазона значений по z не оказывает существенного влияния на общий характер излучения структурированного диска.

Вся расчетная область разбивается на ячейки в сферической системе координат $R \times \theta \times \phi = 200 \times$

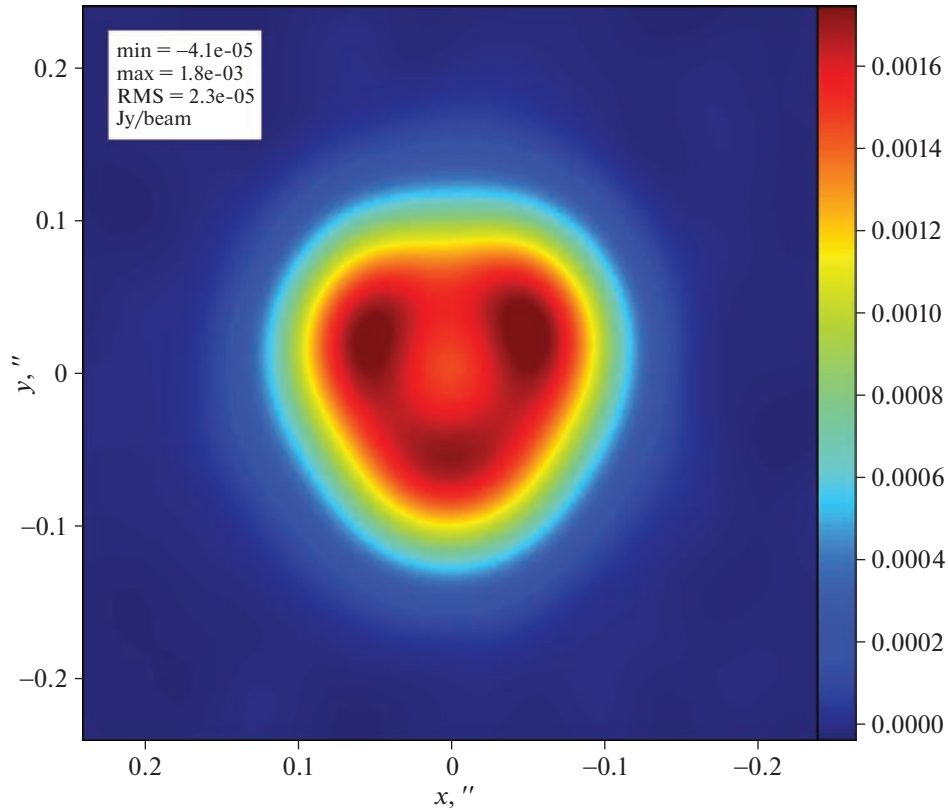


Рис. 6. Изображение осколочного диска на длине волны 870 мкм в модели с $a = 1$ а.е., $d = 10$ пк и $M_{\text{dust}} = 0.001M_{\oplus}$. Цветовая шкала дана в Jy/beam; ее максимум и минимум, а также отношение сигнал—шум, указаны в верхнем левом углу. Координаты по осям даны в угловых секундах.

$\times 4 \times 90$, где $R \in [0.1a : 4a]$, $\theta \in [88^{\circ}85' : 91^{\circ}15']$, $\phi \in [0 : 2\pi)$. В каждой ячейке суммируется количество расчетных частиц (N_i), затем вычисляется плотность частиц каждого сорта в каждой ячейке:

$$\rho_d = \frac{m_D N_i}{R^2 \sin(\theta) d R d\theta d\phi}.$$

Для трехмерных расчетов переноса излучения нами использовался код RADMC-3D¹ (Даллемонд и др., 2012). Число фотонов в расчетах прямого излучения и рассеяния полагалось равным 10^9 . Непрозрачность пыли для магниево-железных силикатов (Доршнер и др., 1995) рассчитывалась по теории Ми (Ми, 1908) с использованием кода (Борен, Хаффман, 1998), включенного в указанный пакет RADMC-3D.

Расчетные потоки излучения использовались нами в моделировании изображений, которые потенциально можно построить с помощью комплекса радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter Array). Моделирование проведено путем

применения симулятора CASA 6.5² (Петри и др., 2012) для (произвольной) эталонной позиции ($\alpha = 04^{\text{h}}33^{\text{m}}$, $\delta = +22^{\circ}53'$, J2000) по аналогии с работой Руге и др. (2015). Тепловой шум был добавлен с помощью опции `tsys-atm` пакета CASA, при этом осаждаемый водяной пар $PWV = 0.6$. Предполагалось, что наблюдения выполнены на длине волны 870 мкм. Полоса пропускания для наблюдений в континууме положена равной 8 ГГц, время экспозиции — пять часам. Конфигурация антенны соответствовала самой большой компактной конфигурации (#20 из доступных конфигураций CASA).

Анализ изображений

В наших расчетах изображений структур осколочных дисков входными параметрами являются масса M_{dust} мелкой (≤ 1 см) пыли, большая полуось a орбиты планеты и расстояние d до объекта. На рис. 6 представлена модель с $M_{\text{dust}} = 0.001M_{\oplus}$, $a = 1$ а.е. и $d = 10$ пк. Полученное в результате

¹<https://www.ita.uni-heidelberg.de/dullemond/software/radmc-3d/>

²<https://casa.nrao.edu/>

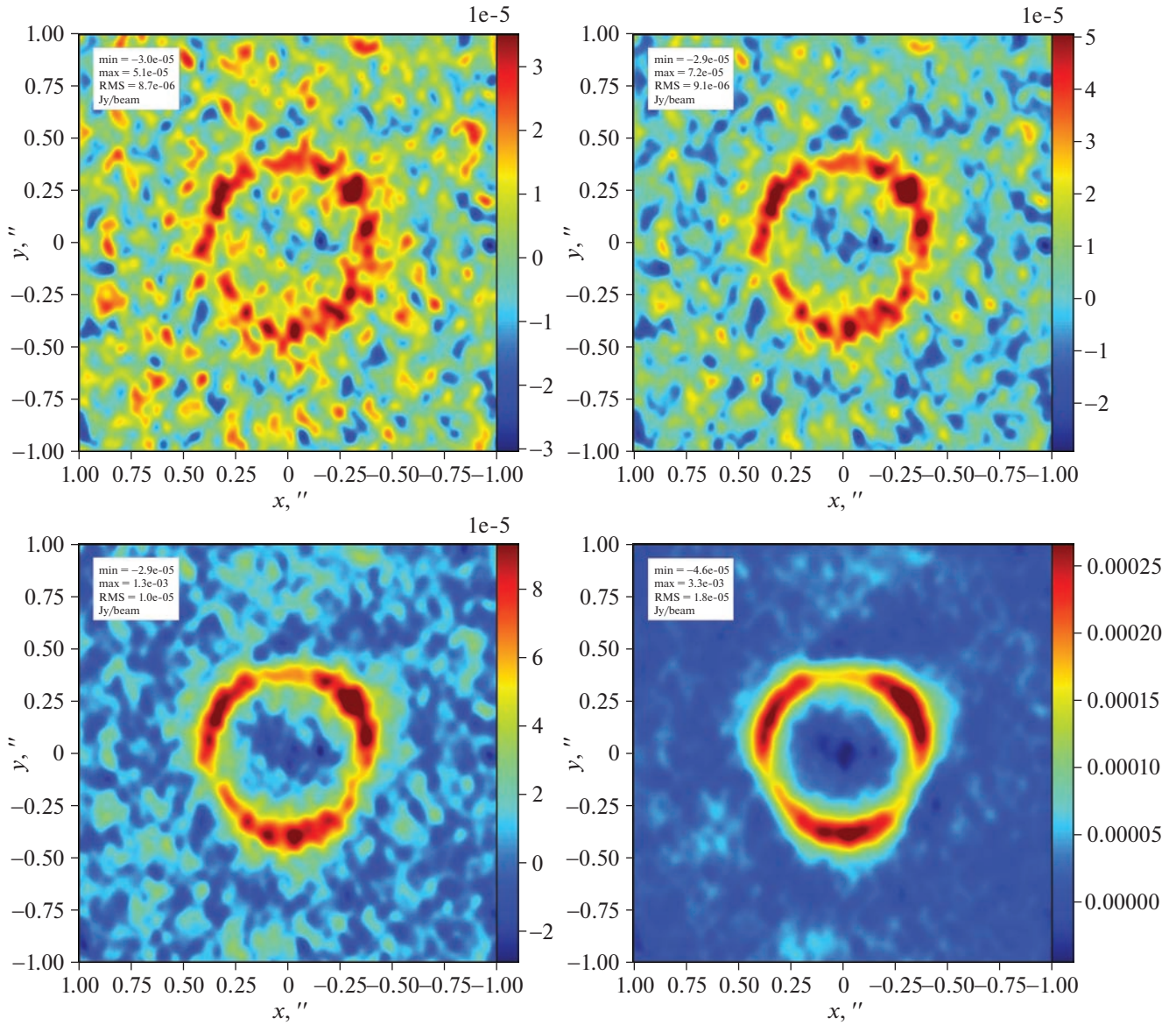


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но в моделях с $a = 5$ а.е. и $d = 10$ пк. Вверху слева — $M_{\text{dust}} = 0.0003M_{\oplus}$, вверху справа — $M_{\text{dust}} = 0.005M_{\oplus}$, внизу слева — $M_{\text{dust}} = 0.001M_{\oplus}$, внизу справа — $M_{\text{dust}} = 0.003M_{\oplus}$.

моделирования изображение размыто, однако яркая область имеет выраженную квазитреугольную форму.

Следующая серия изображений получена в модели с $a = 5$ а.е. и $d = 10$ пк, а масса M_{dust} варьируется (рис. 7). Видно, что в случае малой величины $M_{\text{dust}} \leq 0.0005M_{\oplus}$ структура разрешается на фоне шума, однако она выглядит клочковатой и по существу образует кольцообразное возмущение плотности. С увеличением M_{dust} на изображении проявляются три ярких пятна (которые соответствуют областям повышенной плотности вблизи резонанса $3:2$), и структура диска приобретает характерную квазитреугольную форму.

Перемещение объекта на большее расстояние d от наблюдателя уменьшает разрешение изображения; однако и при $d = 20$ пк три яркие области, соответствующие сгущениям вещества диска, еще вполне различимы, если $M_{\text{dust}} \geq 0.001M_{\oplus}$ (рис. 8, графики вверху). При удалении объекта на 50 пк квазитреугольная структура угадывается при $M_{\text{dust}} = 0.003M_{\oplus}$ (рис. 8, графики внизу) и будет более четкой при больших M_{dust} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами расчеты показали, что частицы диска, исходно попадающие в области резонансов средних движений низких порядков с пла-

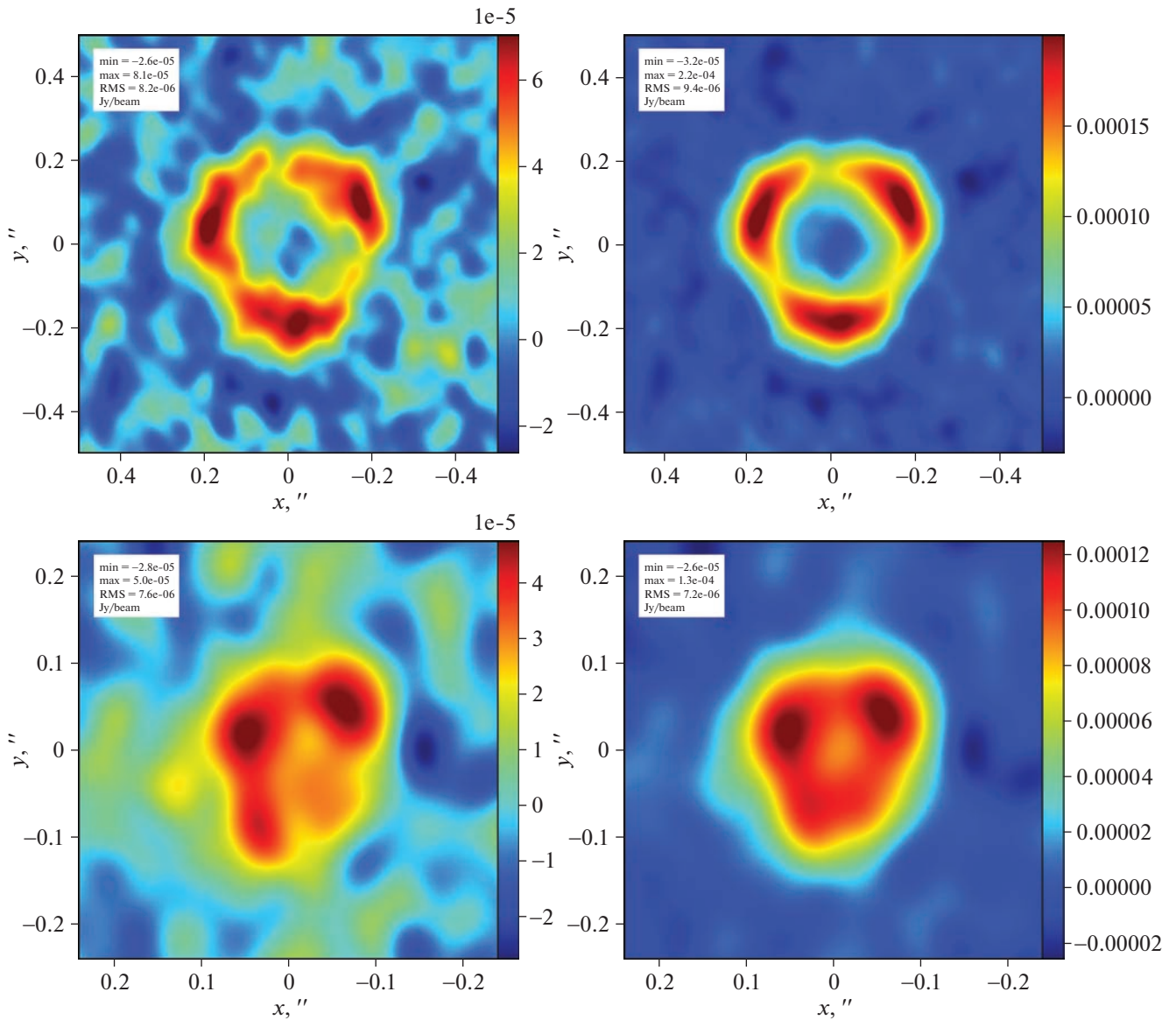


Рис. 8. То же, что и на рис. 6, но в моделях с $a = 5$ а.е. Графики слева соответствуют моделям с $M_{\text{dust}} = 0.001 M_{\oplus}$, справа — $M_{\text{dust}} = 0.003 M_{\oplus}$. Расстояния от наблюдателя до объектов $d = 20$ пк (графики сверху) и $d = 50$ пк (графики внизу).

нетой, со временем концентрируются в заметные азимутальные структуры, образуемые сгущениями и полостями в диске. Во всех моделях проявляются полости пониженной плотности вблизи звезды и планеты. Процесс структурирования обычно занимает время ~ 100 орбитальных периодов планеты. При этом количество частиц, сохраняющих свое положение вблизи резонансов, растет с уменьшением массового параметра μ .

Однако во всех случаях имеет место удаление существенной доли частиц из диска за счет их аккреции на звезду и планету, а также переход на сильно вытянутые и гиперболические орбиты. При этом на гиперболические орбиты частицы могут

уходить из областей всех рассмотренных резонансов, если $\lg \mu > -5$.

В рассмотренных нами моделях наиболее четко проявилась азимутальная структура, ассоциированная с резонансом $3:2$ (если положить $\lg \mu = -3$, что соответствует отношению масс в системе “Солнце–Юпитер”). Наблюдение подобной структуры диска возможно лишь у звезд в ближайшей Галактической окрестности Солнца; при $a > 5$ а.е. и $d > 50$ пк для наблюдаемости необходимо присутствие в диске мелкой пыли существенной массы. Однако следует заметить, что принятое нами при расчетах значение массы M_{dust} не превосходит 3%

от максимально возможной массы мелкой пыли в осколочном диске.

В нашем моделировании также четко проявилась азимутальная структура, ассоциированная с другим рассмотренным нами резонансом первого порядка, а именно, резонансом 2 : 1. Визуальными примерами реально наблюдаемых азимутальных структур, сходных с производимыми этим резонансом, могут служить протопланетные диски звезд HD 169142 (Феделе и др., 2017), HD 97804 (ван дер Плас и др., 2017), и AA Tau (Лумис и др., 2017) (см. рис. 1 в обзоре Эндрюс и др., 2018). Их возможное соответствие теоретическим резонансным моделям заслуживает отдельного анализа.

Если в наблюдаемых изображениях околозвездных дисков удастся отождествить представленные здесь теоретические азимутальные структуры, то путем моделирования изображения в каждом случае можно было бы оценить значения массового параметра μ и большой полуоси a орбиты планеты, удерживающей частицы в области резонанса. Например, в случае обнаружения квазитреугольной яркой структуры на изображении планетезимального диска массовый параметр μ можно оценить, исходя из результатов построения нами модельных изображений, как величину $\gtrsim 10^{-3}$; при этом большая полуось орбиты планеты $a \approx (3/2)^2 / 3a_t \approx 1.3a_t$, где a_t соответствует радиальному положению центров ярких областей структуры.

Расчеты проводились с использованием ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН Филиал Федерального государственного учреждения “Научно-исследовательский институт системного анализа Российской академии наук”³ (Савин и др., 2019). Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 22-22-00046.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агнор и др. (C.B. Agnor, R.M. Canup, and H.F. Levison), *Icarus* **142**, 219 (1999).
2. Бе и др. (H. Beust, J.-C. Augereau, A. Bonsor, J.R. Graham, P. Kalas, J. Lebreton, A.-M. Lagrange, S. Ertel, et al.), *Astron. Astrophys.* **561**, A43 (2014).
3. Борен, Хаффман (C.F. Bohren and D.R. Huffman), *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* p. 544 (1998).
4. ван дер Плас и др. (G. van der Plas, C.M. Wright, F. Ménard, S. Casassus, H. Canovas, C. Pinte, S.T. Maddison, K. Maaskant, et al.), *Astron. Astrophys.* **597**, A32 (2017).
5. Ваят (M.C. Wyatt), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **46**, 339 (2008).
6. Ваят и др. (M.C. Wyatt, S.F. Dermott, C.M. Telesco, R.S. Fisher, K. Grogan, E.K. Holmes, and R.K. Piña), *Astrophys. J.* **527**, 918 (1999).
7. Ваят и др. (M.C. Wyatt, R. Smith, J.S. Greaves, C.A. Beichman, G. Bryden, and C.M. Lisse), *Astrophys. J.* **658**, 569 (2007).
8. Виздом (J. Wisdom), *Astron. J.* **85**, 1122 (1980).
9. Гаспар и др. (A. Gáspár, D. Psaltis, G.H. Rieke, and F. Özel), *Astrophys. J.* **754**, 74 (2012).
10. Гривз (J.S. Greaves), *Science* **307**, 68 (2005).
11. Даллемонд и др. (C.P. Dullemond, A. Juhasz, A. Pohl, F. Sereshti, R. Shetty, T. Peters, B. Commercon, and M. Flock), *Astrophys. Source Code Library ascl:1202.015* (2012).
12. Демидова (T. Demidova), *Astron. Comput.* **41**, 100635 (2022).
13. Демидова, Шевченко (T.V. Demidova and I.I. Shevchenko), *Astrophys. J.* **805**, 38 (2015).
14. Демидова, Шевченко (T.V. Demidova and I.I. Shevchenko), *MNRAS* **463**, L22 (2016).
15. Демидова Т.В., Шевченко И.И., Письма в Астрон. журн. **46**, 827 (2020) [T.V. Demidova, I.I. Shevchenko, *Astron. Lett.* **46**, 774 (2020)].
16. Доминик, Дечин (C. Dominik and G. Decin), *Astrophys. J.* **598**, 626 (2003).
17. Донахи (J.S. Dohnanyi), *J. Geophys. Res.* **74**, 2531 (1969).
18. Доршнер и др. (J. Dorschner, B. Begemann, T. Henning, C. Jaeger, and H. Mutschke), *Astron. Astrophys.* **300**, 503 (1995).
19. Квиллен, Торндайк (A.C. Quillen and S. Thorndike), *Astrophys. J.* **578**, L149 (2002).
20. Квиллен (A.C. Quillen), *MNRAS* **372**, L14 (2006).
21. Квиллен, Фабер (A.C. Quillen and P. Faber), *MNRAS* **373**, 1245 (2006).
22. Кондратьев (B.P. Kondratyev), *MNRAS* **442**, 1755 (2014).
23. Кривов и др. (A.V. Krivov, I. Mann, and N.A. Krivova), *Astron. Astrophys.* **362**, 1127 (2000).
24. Кривов и др. (A.V. Krivov, T. Löhne, and M. Sremčević), *Astron. Astrophys.* **455**, 509 (2006).
25. Кривов (A.V. Krivov), *Res. Astron. Astrophys.* **10**, 383 (2010).
26. Кюхнер, Хольман (M.J. Kuchner and M.J. Holman), *Astrophys. J.* **588**, 1110 (2003).
27. Лене и др. (T. Löhne, A.V. Krivov, and J. Rodmann), *Astrophys. J.* **673**, 1123 (2008).
28. Лумис и др. (R.A. Loomis, K.I. Öberg, S.M. Andrews, and M.A. MacGregor), *Astrophys. J.* **840**, 23 (2017).
29. Львов и др. В.Н. Львов, Р.И. Смехачева, С.С. Смирнов, С.Д. Цекмейстер, *Изв. ГАО РАН* **217**, 318 (2004).
30. Марино (S. Marino), *arXiv e-prints arXiv:2202.03053* (2022).
31. Ми (G. Mie), *Annalen der Physik* **330**, 377 (1908).
32. Моррисон, Мальхотра (S. Morrison and R. Malhotra), *Astrophys. J.* **799**, 41 (2015).

³<https://www.jssc.ru/>

33. Мустилл, Ваят (A.J. Mustill and M.C. Wyatt), *MNRAS* **419**, 3074 (2012).
34. Мюррей, Дермотт (C.D. Murray and S.F. Dermott), *Solar System Dynamics* (Cambridge Univ. Press, 1999) [Мюррей К., Дермотт С., *Динамика Солнечной системы* (М.: Физматлит, 2009, 2010.)].
35. Озерной и др. (L.M. Ozernoy, N.N. Gorkavii, J.C. Mather, and T.A. Taidakova), *Astrophys. J.* **537**, L147 (2000).
36. Петри и др. (D. Petry and CASA Development Team), *Astron. Data Analys. Software and Systems XXI* **461**, 849 (2012).
37. Пирс, Ваят (T.D. Pearce and M.C. Wyatt), *MNRAS* **443**, 2541 (2014).
38. Питиева Е.В., Питиев Н.П., Письма в Астрон. журн. **44**, 604 (2018a) [E.V. Pitjeva and N.P. Pitjev, *Astron. Lett.* **44**, 554 (2018)].
39. Питиева, Питиев (E.V. Pitjeva and N.P. Pitjev), *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* **130**, 57 (20186).
40. Пресс и др. (W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery) *Numerical recipes in C. The art of scientific computing* (Cambridge University Press, 1992), p. 724.
41. Родигас и др. (T.J. Rodigas, R. Malhotra, and P.M. Hinz), *Astrophys. J.* **780**, 65 (2014).
42. Руге и др. (J.P. Ruge, S. Wolf, T. Demidova, and V. Grinin), *Astron. Astrophys.* **579**, A110 (2015).
43. Савин и др. (G.I. Savin, B.M. Shabanov, P.N. Telegin, and A.V. Baranov), *Lobachevskii J. Math.* **40**, 1853 (2019).
44. Су и др. (K.Y.L. Su, G.H. Rieke, R. Malhotra, K.R. Stapelfeldt, A.M. Hughes, A. Bonsor, D.J. Wilner, Z. Balog, et al.), *Astrophys. J.* **763**, 118 (2013).
45. Тебо, Ожеро (P. Thébault and J.-C. Augereau), *Astron. Astrophys.* **472**, 169 (2007).
46. Тейлор (S.R. Taylor), *Meteorit. Planet. Sci. Suppl.* **33**, A153 (1998).
47. Феделе и др. (D. Fedele, M. Carney, M.R. Hogerheijde, C. Walsh, A. Miotello, P. Klaassen, S. Bruderer, Th. Henning, et al.), *Astron. Astrophys.* **600**, A72 (2017).
48. Чемберс, Уэтерилл (J.E. Chambers and G.W. Wetherill), *Icarus* **136**, 304 (1998).
49. Шевченко (I.I. Shevchenko), *Astrophys. Space Sci.* **463**, 1 (2020).
50. Штер, Булирш (J. Stoer and R. Bulirsch), *Introduction to Numerical Analysis* (Springer-Verlag, 1980).
51. Эндрюс и др. (S.M. Andrews, D.J. Wilner, E. Macías, C. González, and A. Isella), *Science with a Next Generation Very Large Array* **517**, 137 (2018).