

## СВЯЗЬ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКОЙ И РАДИО СИСТЕМАМИ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА GAIA DR3 И РСДБ-ИЗМЕРЕНИЯМИ

© 2022 г. В. В. Бобылев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 13.10.2022 г.

После доработки 04.11.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

По литературным данным составлена выборка из 126 радиозвезд с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и собственными движениями, а также имеющимися в каталоге Gaia DR3 (фактически Gaia EDR3). Анализ разностей собственных движений 84 радиозвезд вида “Gaia–РСДБ” на основе модели твердотельного взаимного вращения показал отсутствие значимо отличающихся от нуля скоростей вращения,  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0.06, 0.08, -0.10) \pm \pm (0.06, 0.07, 0.08)$  мсд/год. По разностям тригонометрических параллаксов 90 звезд получена новая оценка систематического смещения между оптической и радио системами,  $\Delta\pi = -0.022 \pm 0.017$  мсд, и показано, что параллактический масштабный множитель близок к единице,  $b = 1.001 \pm 0.002$ .

*Ключевые слова:* шкала расстояний, радиозвезды, Gaia EDR3, Gaia DR3, тригонометрические параллаксы, собственные движения.

DOI: 10.31857/S0320010822110043

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что тригонометрические параллаксы Gaia (Прусти и др., 2016) имеют небольшой сдвиг относительно неподвижных внегалактических источников (квазаров). Небольшой сдвиг, трудно поддающийся учету, сохранился даже в версии Gaia DR3 (Валленари и др., 2022).

Впервые в работе Линдегрена и др. (2018) было отмечено наличие систематического сдвига с величиной  $\Delta\pi = -0.029$  мсд (миллисекунды дуги) в параллаксах Gaia DR2 (Браун и др., 2018) по отношению к инерциальной системе координат. Позже наличие такой поправки в параллаксах Gaia DR2 было подтверждено многими авторами на разнообразном материале, причем с очень хорошей точностью. Например, по большой (около 400 звезд) выборке переменных типа RR Лиры в работе Муравьевой и др. (2018) была найдена поправка  $\Delta\pi = -0.057 \pm 0.006$  мсд. По 89 разделенным затменно-двойным звездам Стассум, Торрес (2018) нашли поправку  $\Delta\pi = -0.082 \pm 0.033$  мсд. Согласно этим авторам, относительные ошибки параллаксов использованных затменно-двойных в среднем не превышают 5% и не зависят от расстояния. Рисс и др. (2018) получили оценку  $\Delta\pi = -0.046 \pm 0.013$  мсд по выборке из 50 долгопериодических цефеид. Использовались фотомет-

рические характеристики этих цефеид, измеренные с борта космического телескопа им. Хаббла. Зинн и др. (2019) из сравнения расстояний около 3000 гигантов каталога APOKASC-2 (Apache Point Observatory Kepler Asteroseismology Science Consortium, Пинсонью и др., 2018) нашли значение  $\Delta\pi = -0.053 \pm 0.009$  мсд.

Анализ параллаксов звезд из каталога Gaia EDR3 (Браун и др., 2021), выполненный Линдегреном и др. (2021), показал, что смещение нуля-пункта параллаксов зависит от звездных величин и положений звезд на небесной сфере. В итоге Линдегреном и др. (2021) был разработан метод учета этого смещения.

В работе Бобылева (2019) было выполнено сравнение параллаксов звезд из каталога Gaia DR2 с измеренными методом РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами). Параметры связи между оптической и радио системами были получены по выборке из 88 мазеров и радиозвезд. Значение найденной поправки составило  $\Delta\pi = -0.038 \pm 0.046$  мсд. Как видно, результат получен с большой неопределенностью. В настоящей работе интересно повторить определение поправки параллаксов по более рафинированной выборке мазеров и радиозвезд для получения более надежной оценки (с меньшей ошибкой).

Сравнение абсолютных собственных движений радиозвезд из каталога Gaia с их РСДБ-

\* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

измерениями позволяют проконтролировать взаимное вращение оптической и радио систем. Такое вращение отражает качество привязки обеих систем к инерциальной системе координат (к далеким квазарам). Сравнение абсолютных собственных движений радиозвезд из каталога Gaia DR2 с их РСДБ-измерениями выполнялось, например, в работах Бобылева (2019), Линдегрена (2020a; 2020б), где был сделан вывод об отсутствии значимо отличающихся от нуля трех компонентов вектора твердотельного взаимного вращения двух этих систем.

Целью настоящей работы является сравнение РСДБ-параллакс и собственных движений радиозвезд с их измерениями из каталога Gaia DR3. При этом известно, что параллаксы и собственные движения звезд в Gaia DR3 просто скопированы из каталога Gaia EDR3.

## ДАННЫЕ

Результаты РСДБ-наблюдений мазеров, ассоциируемых с молодыми звездами и протозвездами, объединены в обзорном проекте BeSSeL (The Bar and Spiral Structure Legacy Survey<sup>1</sup>). Проект нацелен на определение высокоточных расстояний до областей звездообразования, изучение строения, кинематики и динамики Галактики. Важнейшим вкладчиком здесь является американская решетка VLBA, состоящая из десяти 25-метровых антенн с максимальной базовой линией более 8000 км. Наблюдения охватывают частоты 6.7 и 12.2 ГГц с излучением метанольных (CH<sub>3</sub>OH) мазеров, а также частоту 22.2 ГГц с излучением водяных (H<sub>2</sub>O) мазеров.

Другим вкладчиком в обзор BeSSeL является европейская РСДБ-сеть EVN (European VLBI Network). Здесь самые длинные базовые линии составляют около 9000 км, а самой большой в решетке является 100-метровая антенна в Эффельсберге. Наблюдения ведутся на частотах от 6.7 до 22.2 ГГц.

В Японии выполняются РСДБ-наблюдения мазеров по программе VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry<sup>2</sup>). Интерферометр состоит из четырех 20-метровых антенн, расположенных по всей Японии, что обеспечивает базовую длину от 1020 до 2270 км. Выполняются наблюдения H<sub>2</sub>O-мазеров на частоте 22.2 ГГц, реже SiO-мазеров на частоте 43.1 и 42.8 ГГц.

Важнейшим уникальным свойством антенн VERA является двухлучевая приемная система, позволяющая одновременно отслеживать пару

мазерных целей и фазовых опорных источников. Во всех других программах (VLBA, EVN, и др.) наблюдения опорных внегалактических объектов проводятся в начале и конце сессии путем перенацеливания антенн, что потом требует дополнительных усилий для учета атмосферных искажений. Отметим, что астрометрическая точность тем лучше, чем выше частота наблюдений. Таким образом, РСДБ-наблюдения, выполненные по программе VERA, являются наиболее точными по сравнению с наблюдениями, полученными в рамках остальных программ.

Известен также первый результат РСДБ-измерения параллакса источника G 339.884–1.259, полученный с помощью радиоинтерферометра LBA (Long Baseline Array) в Австралии (Кришнан и др., 2015). Интерферометр состоял из пяти антенн большого диаметра (более 20 м), наблюдались метанольные мазеры на частоте 6.7 ГГц.

Помимо мазеров интерес представляют РСДБ-наблюдения радиозвезд в континууме. В настоящее время примерно для 60 молодых звезд, наблюдаемых по программе GOBELINS (Ортиз-Леон и др., 2017) на частоте 5 и 8 ГГц, имеется полная информация — измерены их абсолютные тригонометрические параллаксы и собственные движения, а также известны их лучевые скорости.

Помимо молодых звезд РСДБ-методом определены тригонометрические параллаксы и собственные движения десятков разнообразных звезд, находящихся на более поздних стадиях эволюции — гигантов, красных гигантов, сверхгигантов, мирид, звезд асимптотической ветви гигантов и др. Такие звезды окружены протяженными газопылевыми оболочками, где имеется мазерное излучение. Наблюдения их выполняются на частоте 22 ГГц (H<sub>2</sub>O-мазеры) и 44 ГГц (SiO-мазеры).

Для целей настоящей работы важным источником данных являются списки мазеров и радиозвезд из работ, посвященных сравнению параллакс и собственных движений звезд из каталога Gaia DR2 с их РСДБ-измерениями. Так, в работе Кункель и др. (2018) было выполнено сравнение параллакс с использованием 55 молодых радиозвезд, расположенных в поясе Гулда. Бобылев (2019) получил оценку параметров связи между оптической и радио системами по выборке из 88 мазеров и радиозвезд. Сю и др. (2019) повторили анализ Бобылева, составив список мазеров и радиозвезд из 108 позиций. Список Сю и др. (2019) хорош тем, что в нем даны такие важные сведения о каждой звезде, как информация о двойственности, указана принадлежность а) к молодым объектам, б) к звездам асимптотической ветви гигантов (AGB) и в) к другим объектам.

<sup>1</sup><http://bessel.vlbi-astrometry.org>

<sup>2</sup><http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>

Таблица 1. Данные о 23 звездах, добавленных к списку Сю и др. (2019)

Звезда	$\Delta\mu_{\alpha} \cos \delta \pm \sigma$ мсд/год	$\Delta\mu_{\delta} \pm \sigma$ мсд/год	$\Delta\pi \pm \sigma$ мсд	Ref
DG Tau	$-1.286 \pm 0.812$	$-1.378 \pm 0.906$		(1)
Parenago 1823	$-0.064 \pm 0.235$	$-1.159 \pm 0.551$		(2)
Parenago 1844	$-1.981 \pm 0.205$	$1.119 \pm 0.551$		(2)
Parenago 1872	$-0.168 \pm 0.130$	$-0.086 \pm 0.098$		(2)
Parenago 1896	$0.447 \pm 0.181$	$-0.650 \pm 0.165$		(2)
Parenago 1922	$-0.912 \pm 0.207$	$-0.241 \pm 0.275$		(2)
V1399 Ori	$-0.303 \pm 0.247$	$-0.280 \pm 0.522$		(2)
BX Cam	$-0.082 \pm 0.212$	$0.828 \pm 0.451$	$-0.026 \pm 0.129$	(3)
OZ Gem	$0.948 \pm 0.446$	$-0.832 \pm 0.349$	$-0.348 \pm 0.328$	(4)
R Cnc	$-0.605 \pm 0.392$	$0.785 \pm 0.976$	$0.098 \pm 0.341$	(5)
X Hya	$-0.600 \pm 0.975$	$3.653 \pm 1.475$	$0.461 \pm 0.121$	(5)
W Leo	$0.243 \pm 0.143$	$0.560 \pm 0.129$	$-0.152 \pm 0.110$	(5)
R Hya	$-0.423 \pm 1.151$	$4.356 \pm 1.854$	$-1.194 \pm 0.497$	(5)
Y Lib	$0.179 \pm 2.392$	$-0.031 \pm 4.261$	$-0.023 \pm 0.097$	(6)
S Ser	$2.868 \pm 1.427$	$-1.966 \pm 2.314$	$-0.482 \pm 0.135$	(5)
WR 112	$1.724 \pm 1.110$	$1.680 \pm 1.405$		(7)
MAXI J1820+070	$-0.042 \pm 0.099$	$0.108 \pm 0.120$	$0.021 \pm 0.085$	(8)
V837 Her	$0.372 \pm 0.788$	$-0.365 \pm 0.826$	$-0.913 \pm 0.103$	(9)
WR 125	$-0.821 \pm 0.500$	$0.597 \pm 0.600$		(10)
RR Aql	$2.256 \pm 0.214$	$0.776 \pm 1.462$	$-0.497 \pm 0.139$	(11)
WR 140	$0.755 \pm 0.202$	$-0.674 \pm 0.103$		(10)
WR 146	$2.284 \pm 0.696$	$-1.375 \pm 2.242$		(10)
R Peg	$6.222 \pm 1.535$	$-3.797 \pm 0.924$	$-0.131 \pm 0.304$	(5)

**Примечание.** (1) — Ривера и др. (2015); (2) — Дзиб и др. (2021); (3) — Сю и др. (2022); (4) — Ураго и др. (2020); (5) — Хирота и др. (2020); (6) — Чибузе и др. (2019); (7) — Ям и др. (2015); (8) — Атри и др. (2020); (9) — Чибузе и др. (2020); (10) — Дзиб, Родригес (2009); (11) — Сан и др. (2022).

Сю и др. (2019) предлагают не использовать AGB-звезды в задаче сравнения, так как ма-зерные источники распределены, иногда очень неравномерно, во внешних слоях огромных газопылевых оболочках таких звезд. Это может приводить к несовпадению оптических и радиоизображений. Казалось, что примером могли бы

служить звезды R Aqg или VY CMa, для которых разности параллакс-ов вида Gaia DR2 минус РСДБ имели “запредельные” значения, более 10 мсд. Однако разности параллакс-ов этих звезд при сравнении с каталогом Gaia EDR3 существенно уменьшились (до значений менее 2.5 мсд), причем за счет улучшения оптических измерений. Сю и

**Таблица 2.** Компоненты вектора взаимного вращения оптической (Gaia EDR3) и радио систем, найденные по выборке 24 звезд из работы Линдегрена (2020а,б)

Вид весов $p$	$N_*$	$\omega_x$ , мсд/год	$\omega_y$ , мсд/год	$\omega_z$ , мсд/год
$p = 1$	24	$-0.06 \pm 0.10$	$-0.08 \pm 0.12$	$-0.11 \pm 0.10$
$p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})} + \sigma_{\mu(\text{VLBI})})$	24	$+0.07 \pm 0.06$	$+0.07 \pm 0.08$	$-0.04 \pm 0.07$
$p = 1/\sqrt{\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2}$	24	$+0.07 \pm 0.06$	$+0.07 \pm 0.07$	$-0.05 \pm 0.07$
$p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2)$	24	$+0.17 \pm 0.04$	$+0.18 \pm 0.04$	$+0.01 \pm 0.06$

**Примечание.**  $N_*$  — количество использованных звезд.

**Таблица 3.** Компоненты вектора взаимного вращения оптической (Gaia EDR3) и радио систем, найденные с использованием 96 звезд

Вид весов $p$	$N_*$	$\omega_x$ , мсд/год	$\omega_y$ , мсд/год	$\omega_z$ , мсд/год
$p = 1$	96	$-0.10 \pm 0.09$	$-0.02 \pm 0.13$	$-0.01 \pm 0.09$
$p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})} + \sigma_{\mu(\text{VLBI})})$	96	$-0.02 \pm 0.08$	$+0.06 \pm 0.11$	$-0.04 \pm 0.07$
$p = 1/\sqrt{\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2}$	96	$-0.02 \pm 0.08$	$+0.06 \pm 0.11$	$-0.04 \pm 0.07$
$p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2)$	84	$+0.06 \pm 0.06$	$+0.08 \pm 0.07$	$-0.10 \pm 0.08$

**Примечание.**  $N_*$  — количество звезд, оставшихся после отбрасывания по критерию  $3\sigma$ .

др. (2019) предлагают также в задаче сравнения не использовать двойные звезды. С этим можно согласиться.

Отметим результат Линдегрена (2020а,б), который взял 41 яркую звезду из списка Сю и др. (2019) с собственными движениями из каталога Gaia DR2, имеющих РСДБ-измерения. Линдегрэн отбросил почти половину из этих звезд, следуя разработанным им критериям. По разностям собственных движений оставшихся 26 звезд получил оценку трех компонент вектора взаимного вращения оптической и радио систем:  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (-0.068, -0.051, -0.014) \pm \pm (0.052, 0.045, 0.066)$  мсд/год, сделав очевидный вывод об отсутствии значимо отличающихся от нуля скоростей взаимного вращения. Однако из 26 использованных для анализа звезд 5 являются AGB-звездами, 11 — двойными, причем две звезды (Суг X-1 и LSI +61 303) являются яркими компонентами систем с черной дырой.

В настоящей работе мы взяли за основу список мазеров и радиозвезд из работы Сю и др. (2019), дополнив его более поздними публикациями, посвященными определению тригонометрических параллаксов и собственных движений таких объектов РСБД-методом. Это публикации Чибузе и др. (2020), Хироты и др. (2020), Сю и др. (2022) и

Саны и др. (2022). Итоговый наш список содержит 126 позиций, причем для 126 звезд имеются измерения собственных движений как в радиодиапазоне, так и в оптике (Gaia EDR3), а РСДБ-параллаксы измерены только для 114 звезд.

Отметим, что список Сю и др. (2019) содержит данные о 108 звездах. Причем примерно для десяти звезд имелась информация только о РСДБ-измерениях. Для некоторых из таких звезд появились измерения в каталоге Gaia DR3. В итоге список звезд с реальной измерительной информацией увеличился на 23 звезды. Разности собственных движений и параллаксов вида “Gaia-РСДБ” этих 23 звезд даны в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Сравнение собственных движений звезд

Для определения трех угловых скоростей взаимного вращения двух систем вокруг экваториальных осей координат  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  используем уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned} \Delta\mu_\alpha \cos \delta &= -\omega_x \cos \alpha \sin \delta - & (1) \\ & - \omega_y \sin \alpha \sin \delta + \omega_z \cos \delta, \\ \Delta\mu_\delta &= +\omega_x \sin \alpha - \omega_y \cos \alpha, \end{aligned}$$

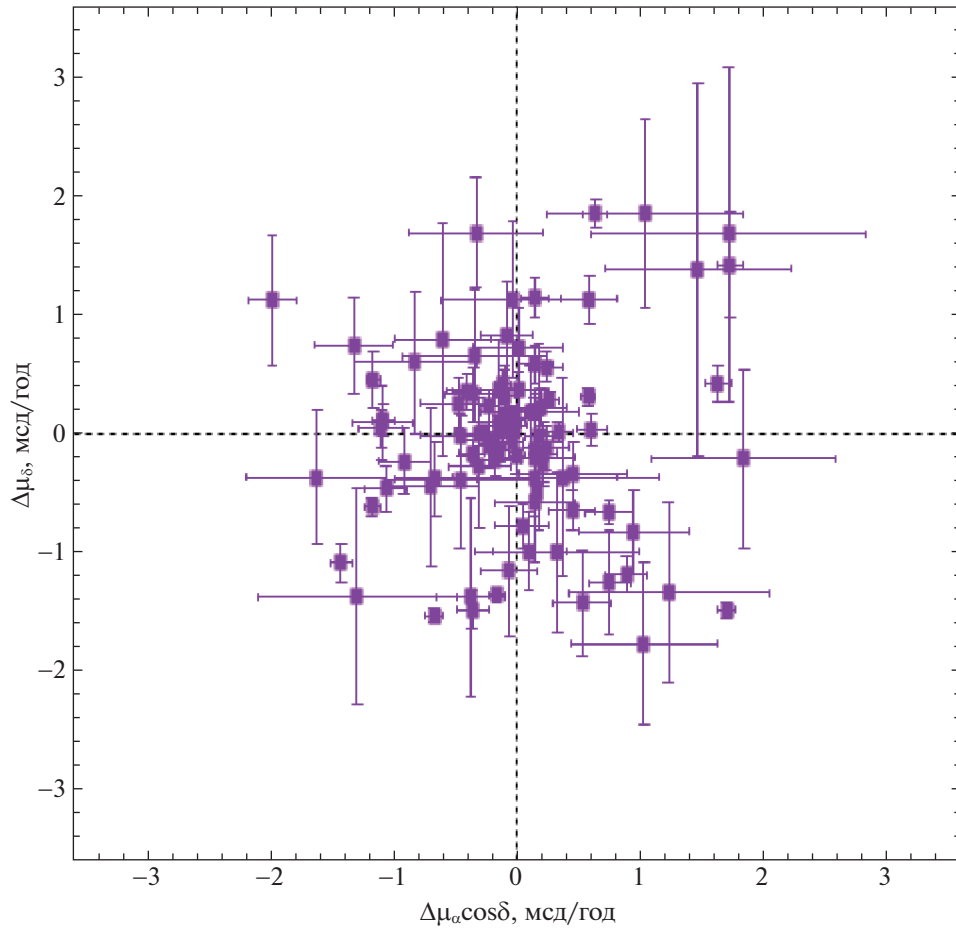


Рис. 1. Разности собственных движений звезд вида “Gaia–РСДБ”.

где в левых частях уравнений находятся разности вида “Gaia минус РСДБ”. Систему условных уравнений вида (1) решаем методом наименьших квадратов как с единичными весами ( $p = 1$ ), так и с весами, обратно пропорциональными ошибкам измерений, либо квадратам ошибок измерений. Например, в работе Бобылева (2019) применялись веса вида  $p = 1/\sqrt{\sigma_{\mu(Gaia)}^2 + \sigma_{\mu(VLBI)}^2}$ , а Сю и др. (2019) предлагают использовать веса вида  $p = 1/(\sigma_{\mu(Gaia)}^2 + \sigma_{\mu(VLBI)}^2)$ .

В начале на основе системы условных уравнений вида (1) была проанализирована выборка из 26 звезд, отобранных Линдегеном (2020а,б). При этом нами были использованы разности собственных движений 24 звезд, модули которых не превышают 2 мсд/год. Результаты, полученные с весами четырех видов, отражены в табл. 2.

В табл. 3 даны компоненты вектора взаимного вращения оптической и радио систем, найденные с использованием 96 звезд нашего списка. Модули разностей собственных движений этих звезд не

превышают 2 мсд/год. Распределение разностей этих звезд дано на рис. 1.

### Сравнение параллакс

Параметры связи между параллаксами двух систем ищем методом наименьших квадратов из решения системы условных линейных уравнений вида

$$\pi_{(Gaia)} = a + b\pi_{(VLBI)}. \quad (2)$$

Для сравнения тригонометрических параллакс были использованы звезды с относительными ошибками параллакс, не превышающими 30%, как в случае звезд каталога Gaia DR3, так и в случае РСДБ-измерений.

В табл. 4 даны оценки параметров уравнения (2)  $a$  и  $b$ , найденные с применением весов нескольких видов. Дано также средневзвешенное значение разности параллакс вида “Gaia минус РСДБ”, которое вычислялось параллельно по тем же звездам. Вычисления проведены, следуя рекомендациям Сю и др. (2019), для трех случаев:

**Таблица 4.** Параметры уравнения (2)  $a$  и  $b$ , а также среднее значение  $\Delta\pi$ , вычисленное по разностям вида “Gaia минус РСДБ”

Вид решений	$N_*$	$a$ , мсд	$b$	$\Delta\pi$ , мсд
$p = 1$				
Все	100	$-0.082 \pm 0.041$	$1.002 \pm 0.003$	$-0.068 \pm 0.036$
Без AGB-звезд	84	$-0.065 \pm 0.041$	$1.002 \pm 0.003$	$-0.049 \pm 0.036$
Только одиночные	45	$-0.020 \pm 0.099$	$0.983 \pm 0.021$	$-0.088 \pm 0.053$
$p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})} + \sigma_{\mu(\text{VLBI})})$				
Все	97	$-0.031 \pm 0.030$	$1.002 \pm 0.003$	$-0.038 \pm 0.026$
Без AGB-звезд	82	$-0.032 \pm 0.029$	$1.001 \pm 0.003$	$-0.033 \pm 0.027$
Только одиночные	43	$-0.106 \pm 0.071$	$1.013 \pm 0.015$	$-0.047 \pm 0.040$
$p = 1/\sqrt{\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2}$				
Все	97	$-0.029 \pm 0.030$	$1.001 \pm 0.003$	$-0.037 \pm 0.026$
Без AGB-звезд	82	$-0.030 \pm 0.028$	$1.002 \pm 0.003$	$-0.031 \pm 0.026$
Только одиночные	44	$-0.109 \pm 0.071$	$1.014 \pm 0.015$	$-0.046 \pm 0.039$
$p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2)$				
Все	90	$-0.020 \pm 0.022$	$1.001 \pm 0.002$	$-0.022 \pm 0.017$
Без AGB-звезд	77	$-0.015 \pm 0.021$	$0.998 \pm 0.002$	$-0.019 \pm 0.018$
Только одиночные	41	$-0.047 \pm 0.042$	$1.010 \pm 0.009$	$-0.018 \pm 0.027$

**Примечание.**  $N_*$  — количество звезд, оставшихся после отбрасывания по критерию  $3\sigma$ .

а) по всей выборке; б) без использования AGB-звезд; в) только по одиночным звездам. Видно, что одиночных звезд в нашей выборке слишком мало для получения надежного результата. Параметры  $a$  и  $\Delta\pi$  характеризуют одну величину, однако  $\Delta\pi$  вычисляется, как можно видеть из табл. 4, с меньшей ошибкой.

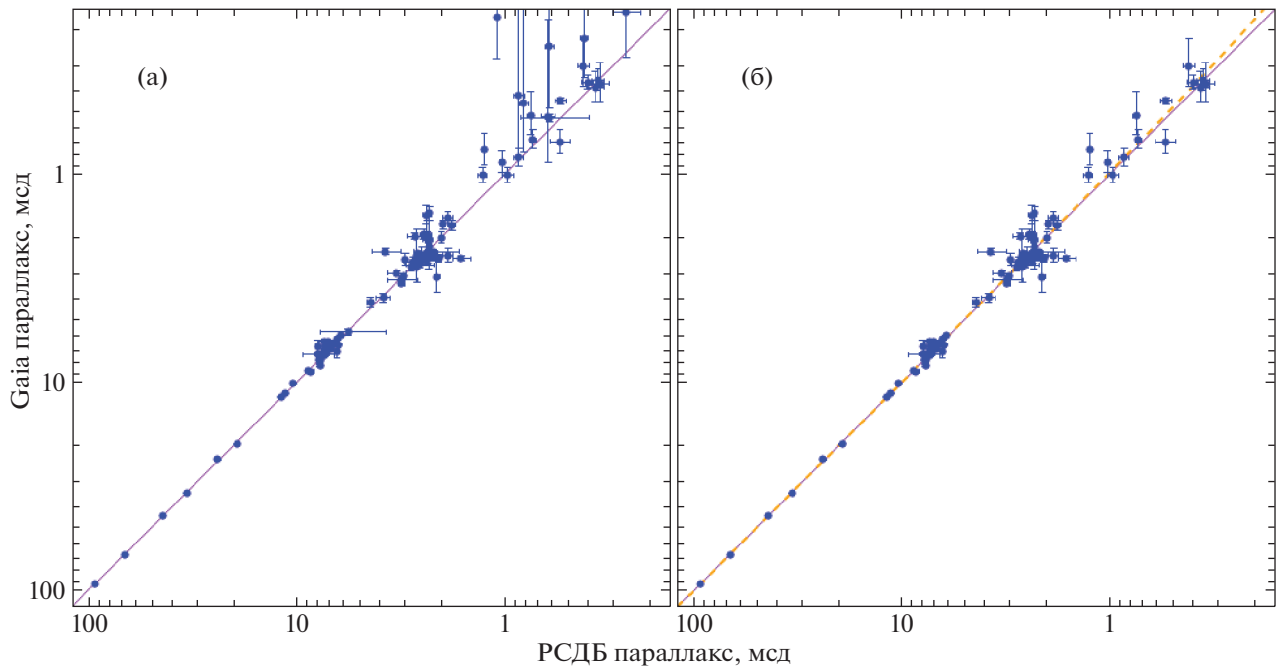
На рис. 2 даны параллаксы радиозвезд из каталога Gaia DR3 в зависимости от их РСДБ-параллаксов. На рис. 2б видно, что обе шкалы практически идентичны на больших расстояниях от Солнца. На рис. 2а даны параллаксы звезд из каталога Gaia, измеренные с относительными ошибками  $\sigma_\pi/\pi < 100\%$  в зависимости от параллаксов звезд, которые измерены РСДБ-методом при этом же ограничении,  $\sigma_\pi/\pi < 100\%$ . На рис. 2б даны параллаксы звезд, измеренные с ошибками  $\sigma_\pi/\pi < 30\%$ . Очевидно, что для получения надежных оценок искомым параметрам необходимо на-

кладывать ограничения либо на радиус выборки, либо на величину относительной ошибки  $\sigma_\pi/\pi$ . В настоящей работе выбран второй вариант.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В работе Бобылева (2019) был сделан вывод об отсутствии значимо отличающихся от нуля скоростей взаимного вращения между оптической и радио системами. При этом были использованы разности звезд, модули которых не превышают 6 мсд/год (рис. 1 в работе Бобылева). В настоящей же работе имеем для анализа большее количество звезд в более компактной области, так как их модули не превышают 2 мсд/год (рис. 1).

Результаты, полученные в настоящей работе с использованием собственных движений этих звезд из каталога Gaia EDR3 (табл. 2), подтверждают вывод Линдегрена (2020а,б) об отсутствии значимо



**Рис. 2.** Параллаксы радиозвезд из каталога Gaia в зависимости от их параллаксов, измеренных средствами РСДБ с относительными ошибками в каждом случае  $\sigma_\pi/\pi < 100\%$  (а), и с ошибками  $\sigma_\pi/\pi < 30\%$  (б), сплошная линия соответствует корреляции с коэффициентом 1, пунктирная линия на панели (б) соответствует значениям  $a = -0.022$  мсд и  $b = 1.001$  в уравнении (2).

отличающихся от нуля компонент вектора взаимного вращения между системами. При этом необходимо отметить, что веса вида  $p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2)$  дают ненадежный результат при малой статистике.

Результаты, которые даны в табл. 3, получены по большой статистике, и применение весов вида  $p = 1/(\sigma_{\mu(\text{Gaia})}^2 + \sigma_{\mu(\text{VLBI})}^2)$  позволило получить значения компонент вектора взаимного вращения с наименьшими (по сравнению с полученными с другими весами) ошибками. Отметим, что в работе Бобылева (2019) было показано, что параллактический масштабный множитель  $b$  (см. соотношение (2)) составляет  $1.002 \pm 0.007$ .

В работе Сю и др. (2019) по выборке из 34 одиночных звезд без привлечения AGB-звезд была получена оценка систематического смещения параллаксов звезд каталога Gaia DR2  $\Delta\pi = -0.075 \pm 0.029$  мсд. Оценка  $\Delta\pi = -0.022 \pm 0.017$  мсд, полученная в настоящей работе (табл. 4), имеет существенно меньшую ошибку. Отметим, что, как показала практика, это было достигнуто путем применения следующих важных ограничений: а) на уровень относительных ошибок параллаксов звезд ( $\sigma_\pi/\pi < 30\%$ ) в обоих сравниваемых каталогах и б) на модуль разностей параллаксов ( $< 2$  мсд).

Небольшой сдвиг нуля-пункта параллаксов со средней величиной  $\Delta\pi \sim -0.019$  мсд сохранился в версии Gaia DR3, фактически перешедший из каталога Gaia EDR3. Такой сдвиг с величиной  $\Delta\pi = -0.021$  мсд был подтвержден Гроенвегеном (2021) по квазарам и с величиной  $\Delta\pi = -0.039$  мсд при использовании 75 классических цефеид. С величиной  $\Delta\pi = -0.025 \pm 0.004$  мсд — в работе Рена и др. (2021) из анализа  $\sim 110\,000$  затменных двойных систем. По выборке разделенных затменно-двойных, ранее использованных Стассумом, Торресом (2018) при анализе данных Gaia DR2, в новой работе этих авторов (Стассум, Торрес, 2021) найдена поправка  $\Delta\pi = -0.037 \pm 0.033$  мсд. В работе Ляо и др. (2021) по выборке из  $\sim 300\,000$  квазаров из каталога Gaia EDR3, с использованием сферических функций для анализа разностей, была найдена поправка  $\Delta\pi = -0.021$  мсд для пятипараметрического решения и  $\Delta\pi = -0.027$  мсд в случае шестипараметрического решения. Поправка  $\Delta\pi = -0.028$  мсд была найдена в работе Ванга и др. (2022) при сравнении с каталогом Gaia EDR3 около 300 000 гигантов из каталога LAMOST DR8 (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope).

Зависимость  $\Delta\pi$  от звездной величины и координат звезд была детально изучена в работе Линдегрена и др. (2021). Предложенный этими

авторами метод учета такой поправки (для двух случаев — пятипараметрического и шестипараметрического решений) дает хорошие результаты, как показал анализ различных звезд (Рен и др., 2021; Хуанг и др., 2021; Зинн, 2021; Ванг и др., 2022).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Список мазеров и радиозвезд из работы Сю и др. (2019) дополнен более поздними публикациями, посвященными определению тригонометрических параллаксов и собственных движений радиозвезд РСДБ-методом. В итоговый список вошли 126 объектов. Для 126 звезд имеются измерения собственных движений как в радиодиапазоне, так и в оптике (Gaia EDR3), а РСДБ-параллаксы измерены для 114 звезд.

Анализ разностей собственных движений радиозвезд вида “Gaia–РСДБ” проведен на основе модели твердотельного вращения с использованием различного вида весов. Окончательный вариант вычислений получен с весами вида  $p = 1/(\sigma_{\mu(Gaia)}^2 + \sigma_{\mu(VLBI)}^2)$ , применение которых позволило получить оценки искомых параметров с наименьшими ошибками. В частности, показано отсутствие значимо отличающихся от нуля скоростей взаимного вращения между оптической и радио системами  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0.06, 0.08, -0.10) \pm \pm (0.06, 0.07, 0.08)$  мсд/год. Это также говорит о том, что каждая из этих систем отлично привязана к опорной системе неподвижных внегалактических источников.

По разностям тригонометрических параллаксов 90 звезд вида “Gaia–РСДБ” получена новая оценка систематического смещения между оптической и радио системами,  $\Delta\pi = -0.022 \pm 0.017$  мсд и показано, что параллактический масштабный множитель близок к единице,  $b = 1.001 \pm 0.002$ . Вычисления с использованием разностей параллаксов этих звезд были проведены по всей выборке, а также по выборке только одиночных звезд. Радикальных отличий в оценках искомых параметров не обнаружено, поэтому был выбран вариант с большим количеством звезд, а именно, с использованием всей выборки.

Автор благодарен рецензентам за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атри и др. (P. Atri, J.C.A. Miller-Jones, A. Bahramian, et al.), *MNRAS* **493**, L81 (2020).
2. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **45**, 13 (2019) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **45**, 10 (2019)].
3. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
4. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 1 (2021).
5. Валленари и др. (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, et al.), arXiv: 2208.0021 (2022).
6. Ванг и др. (C. Wang, H. Yuan, and Y. Huang), *Astron. J.* **163**, 149 (2022).
7. Гроеневеген (M.A.T. Groenewegen), *Astron. Astrophys.* **654**, 20 (2021).
8. Дзиб, Родригес (S.A. Dzib and L.F. Rodriguez), *Rev. Mex. Astron. Astrof.* **45**, 3 (2009).
9. Дзиб и др. (S.A. Dzib, J. Forbrich, M.J. Reid, and K.M. Menten), *Astrophys. J.* **906**, 24 (2021).
10. Зинн и др. (J.C. Zinn, M.H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello), *Astrophys. J.* **878**, 136 (2019).
11. Зинн (J.C. Zinn), *Astron. J.* **161**, 214 (2021).
12. Кришнан и др. (V. Krishnan, S.P. Ellingsen, M.J. Reid, et al.), *Astrophys. J.* **805**, 129 (2015).
13. Кункель и др. (M. Kounkel, K. Covey, G. Suarez, et al.), *Astron. J.* **156**, 84 (2018).
14. Линдегрэн и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 2 (2018).
15. Линдегрэн (L. Lindegren), *Astron. Astrophys.* **633**, A1 (2020a).
16. Линдегрэн (L. Lindegren), *Astron. Astrophys.* **637**, C5 (2020b).
17. Линдегрэн и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, U. Bastian, M. Biermann, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 4 (2021).
18. Ляо и др. (S. Liao, Q. Wu, Z. Qi, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **133**, 094501 (2021).
19. Муравьева и др. (T. Muraveva, H.E. Delgado, G. Clementini, et al.), *MNRAS* **481**, 1195 (2018).
20. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-León, L. Loinard, M.A. Kounkel, et al.), *Astrophys. J.* **834**, 141 (2017).
21. Пинсонью и др. (M.H. Pinsonneault, Y.P. Elsworth, J. Tayar, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **239**, 32 (2018).
22. Прусты и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 1 (2016).
23. Рен и др. (F. Ren, X. Chen, H. Zhang, et al.), *Astrophys. J.* **911**, 20 (2021).
24. Ривера и др. (J.L. Rivera, L. Loinard, S.A. Dzib, et al.), *Astrophys. J.* **807**, 119 (2015).
25. Рисс и др. (A.G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, et al.), *Astrophys. J.* **861**, 126 (2018).
26. Сан и др. (Y. Sun, B. Zhang, M.J. Reid, et al.), *Astrophys. J.* **931**, 74 (2022).
27. Стассум, Топпес (K.G. Stassun, G. Torres), *Astrophys. J.* **862**, 61 (2018).



28. Стассум, Торрес (K.G. Stassun, G. Torres), *Astrophys. J.* **907**, L33 (2021).
29. Сю и др. (S. Xu, B. Zhang, M.J. Reid, et al.), *Astrophys. J.* **875**, 114 (2019).
30. Сю и др. (S. Xu, H. Imai, Y. Yun, et al.), arXiv: 2210.02812 (2022).
31. Ураго и др. (R. Urago, R. Yamaguchi, T. Omodaka, et al.), *PASJ* **72**, 57 (2020).
32. Хирота и др. (VERA collaboration, T. Hirota, T. Nagayama, M. Honma, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **70**, 51 (2020).
33. Хуанг и др. (Y. Huang, H. Yuan, T.C. Beers, and H. Zhang), *Astrophys. J.* **910**, 5 (2021).
34. Чибузе и др. (J.O. Chibueze, R. Urago, T. Omodaka, et al.), *PASJ* **71**, 92 (2019).
35. Чибузе и др. (J.O. Chibueze, R. Urago, T. Omodaka, et al.), *PASJ* **72**, 59 (2020).
36. Ям и др. (J.O. Yam, S.A. Dzib, L.F. Rodriguez, and V. Rodriguez-Gómez), *Rev. Mex. Astron. Astrof.* **51**, 33 (2015).