ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 45, № 1, с. 13–23

# ПАРАМЕТРЫ СВЯЗИ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКОЙ И РАДИОСИСТЕМАМИ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА GAIA DR2 И РСДБ-ИЗМЕРЕНИЯМ

© 2019 г. В. В. Бобылев[1*]

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

Поступила в редакцию 07.06.2018 г.; после доработки 03.09.2018 г.; принята к публикации 04.09.2018 г.

По литературным данным составлена выборка из 88 радиозвезд, для которых имеются измерения тригонометрических параллаксов и собственных движений как в каталоге Gaia DR2, так и РСДБ-измерения. Из анализа разностей тригонометрических параллаксов вида "Gaia–РСДБ" получена новая оценка систематического смещения между оптической и радиосистемами: $\Delta\pi = -0.038 \pm \pm 0.046$ мсд (с дисперсией 0.156 мсд). Это означает, что параллаксы Gaia DR2 необходимо увеличить на эту поправку. Показано, что внутри окрестности Солнца радиусом около 3 кпк, параллактический масштабный множитель всегда очень близок к единице: $b = 1.002 \pm 0.007$. Анализ разностей собственных движений радиозвезд на основе модели твердотельного взаимного вращения показал отсутствие значимо отличающихся от нуля скоростей вращения: $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (-0.14, 0.03, -0.33) \pm \pm (0.15, 0.22, 0.16)$ мсд/год.

*Ключевые слова:* шкала расстояний, радиозвезды, Gaia DR2, тригонометрические параллаксы.

**DOI:** 10.1134/S0320010819010029

## ВВЕДЕНИЕ

Высокоточные расстояния до звезд требуются для решения многих звездно-астрономических задач. Одними из надежнейших являются тригонометрические параллаксы. Однако перед использованием даже самых надежных данных необходимо выполнить контроль и исключение возможных систематических смещений.

В сентябре 2016 г. был опубликован первый релиз данных космического эксперимента Gaia (Прусти и др., 2016; Браун и др., 2016). В апреле 2018 г. появился второй выпуск данных этого эксперимента, Gaia DR2 (Браун и др., 2018). Этот каталог содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 1.7 млрд звезд. Вывод их значений базируется на орбитальных наблюдениях, выполненных в течение 22 мес. Средняя ошибка определения тригонометрического параллакса и обоих компонент собственного движения звезды в этом каталоге зависит от звездной величины. Например, для ярких звезд ($G < 15^m$) ошибки параллаксов заключены в интервале 0.04–0.02 миллисекунд дуги (мсд), а для слабых звезд ($G = 20^m$) они составляют около 0.7 мсд.

В работе Линдегрена и др. (2018) отмечено наличие возможного систематического сдвига $\Delta\pi = = -0.029$ мсд в параллаксах Gaia DR2 по отношению к инерциальной системе координат. В настоящее время имеется несколько надежных шкал расстояний, сравнение с которыми позволяет, по мнению авторов этих шкал, контролировать систематику тригонометрических параллаксов Gaia.

Стассум, Торрес (2016) нашли довольно значительное среднее смещение $\Delta\pi = -0.25 \pm 0.05$ мсд тригонометрических параллаксов Gaia DR1 по отношению к параллаксам калибровочной выборки затменно-двойных. Вскоре этот результат был подтвержден другими авторами из анализа близких к Солнцу классических цефеид (Казертано и др., 2017), наземных параллаксов ближайших M-карликов (Жао и др., 2016), а также данных астросейсмологии (Хубер и др., 2017).

Из сравнения параллаксов 89 звезд из каталога Gaia DR2 и калибровочных затменно-двойных звезд Стассун, Торрес (2018) обнаружили наличие небольшого смещения между системами $\Delta\pi = = -0.082 \pm 0.033$ мсд. Такое значение находит подтверждение и в работах других авторов. В частности, при анализе цефеид (Рисс и др., 2018) и данных астросейсмологии (Зинн и др., 2018).

В этой связи интерес представляют расстояния до радиозвезд, определяемые методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Здесь имеются в виду абсолютные параллаксы, абсолютизация которых выполняется в процессе

*Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

наблюдений с использованием квазаров. В настоящее время РСДБ-наблюдения с целью определения высокоточных тригонометрических параллаксов и собственных движений радиоисточников, в частности, галактических мазеров, выполняются несколькими научными коллективами.

Точность астрометрических РСДБ-измерений зависит от многих факторов. Например, в работе Праделя и др. (2006) можно найти оценки вкладов от положения калибровочного источника, ориентации Земли, положения антенны и тропосферной задержки для радиоисточников, находящихся на различных склонениях. Кроме того, средняя ошибка определения РСДБ-параллаксов зависит от частоты наблюдения: она тем меньше, чем выше частота. В итоге при наблюдениях на частоте 22.2 ГГц средняя ошибка определения РСДБ-параллаксов составляет приблизительно 0.01 мсд.

Каталог Gaia DR2 содержит астрометрические параметры для более чем полумиллиона квазаров. Это позволило реализовать оптическую кинематически не вращающуюся опорную систему координат Gaia-CRF2 (GaiaDR2-Celestial Reference Frame). Часть квазаров имеет точные РСДБ-положения, что позволяет (Миньяр и др., 2018) согласовать оси этой системы с принятой международной небесной системой координат (International Celestial Reference System, ICRF), задаваемую набором радиоисточников, например, ICRF2 или ICRF3 (в настоящее время находится в процессе разработки). Как показано Миньяром и др. (2018), координатные оси каталога Gaia DR2 и прототипа ICRF3 согласованы с ошибками 20–30 мсд, но более точные значения этих ошибок будут представлены после более детального изучения разнообразных ошибок. В этой связи представляет интерес определение параметров взаимного вращения между двумя системами (оптической и радио) с использованием собственных движений радиозвезд.

Целью настоящей работы является создание по литературным данным коллекции РСДБ-наблюдений абсолютных параллаксов и собственных движений радиозвезд, общих с каталогом Gaia DR2. Использование полученной выборки в качестве калибровочной для контроля шкалы расстояний каталога Gaia DR2.

## ДАННЫЕ

В настоящей работе собраны РСДБ-наблюдения тригонометрических параллаксов и собственных движений звезд, выполненные и опубликованные различными научными коллективами. Это, например, японский проект VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry), посвященный наблюдениям $H_2O$-мазерных источников на частоте 22.2 ГГц (Хирота и др., 2008) и ряда SiO-мазеров на частоте 43 ГГц (Ким и др., 2008). Метанольные ($CH_3OH$) и $H_2O$-мазеры наблюдаются в США на VLBA (Рид и др., 2009). Аналогичные наблюдения выполняются и в рамках Европейской РСДБ-сети (Ригл и др., 2010). С такими же целями ведутся и РСДБ-наблюдения радиозвезд в континууме на частоте 8.4 ГГц (Торрес и др., 2012).

В табл. 1 даны разности собственных движений и тригонометрических параллаксов для 88 звезд. Звезды имеют различный эволюционный статус. Часть из них является очень молодыми звездами с мазерным излучением ($H_2O$ и $CH_3OH$ мазеры). Другую часть выборки составили гиганты асимптотической ветви, которые наблюдаются как OH-, $H_2O$- и SiO-мазеры. Наблюдения значительного количества источников проводились в континууме. Это относится к таким объектам, как пульсары, звезды Вольфа-Райе, системы с черными дырами, а также целый ряд звезд типа T Тельца.

В работе Бобылева (2010) были использованы 23 радиозвезды из этого списка для изучения привязки каталога HIPPARCOS (1997) к инерциальной системе координат. В настоящей работе список существенно расширен, как за счет увеличения РСДБ-наблюдений, так и благодаря большой плотности каталога Gaia DR2.

В первой колонке таблицы даны обозначения радиозвезд, с использованием которых они легко находятся в электронной поисковой системе SIMBAD. Во второй колонке указан тип звезды или ее спектральный класс. В следующих колонках даны разности собственных движений и тригонометрических параллаксов. Для каждого вида разностей даны дисперсии разностей. Например, для собственных движений формула для вычисления дисперсии разностей имеет следующий вид:

$$\sigma_{\Delta_\mu} = \sqrt{\sigma^2_{\mu_{Gaia}} + \sigma^2_{\mu_{VLBI}}}, \qquad (1)$$

для дисперсий разностей параллаксов выражение имеет аналогичный вид при соответствующей подстановке.

Для восьми звезд в табл. 1 отсутствуют разности параллаксов. Это обусловлено либо отрицательными значениями параллаксов в каталоге Gaia DR2, либо отсутствием (например, для звезд типа Вольфа-Райе) РСДБ-измерений. В то же время указанные восемь звезд использованы нами при анализе разностей собственных движений. Для двух звезд, RT Vir и FV Boo, имеются данные только об измерении их РСДБ-параллаксов.

Из табл. 1 видно, что несколько звезд имеют значения разностей, сильно отличающихся от ожидаемого нуля. Это, например, звезды R Aqr с $\Delta\mu_\alpha \cos\delta = -9.800 \pm 0.632$ мсд/год, VSSG11 с

**Таблица 1.** Разности собственных движений и параллаксов звезд вида “Gaia DR2–РСДБ”

| Звезда | Тип или спектр | $\Delta\mu_\alpha \cos\delta$, мсд/год | $\sigma_{\Delta\mu_\alpha \cos\delta}$, мсд/год | $\Delta\mu_\delta$, мсд/год | $\sigma_{\Delta\mu_\delta}$, мсд/год | $\Delta\pi$, мсд | $\sigma_{\Delta\pi}$, мсд | Ref |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SY Scl | Mira | .541 | .328 | −.155 | .314 | −.075 | .229 | (1) |
| S Per | RSG | .480 | .458 | −1.380 | .451 | −.191 | .123 | (2) |
| HII 174 | RS CVn | .020 | .122 | −.105 | .172 | −.111 | .057 | (3) |
| HII 625 | BY Dra | .409 | .134 | −.121 | .275 | −.008 | .070 | (3) |
| HII 1136 | RS CVn | −.800 | .098 | .346 | .246 | −.161 | .057 | (3) |
| HII 2147 | RS CVn | −2.579 | .112 | .879 | .171 | −.119 | .062 | (3) |
| V773 Tau | T Tau | −1.321 | .929 | −3.935 | .391 | .113 | .164 | (4) |
| HIP 20097 | T Tau | −.020 | .129 | −.115 | .064 | −.084 | .059 | (5) |
| HDE 283572 | T Tau | .158 | .150 | .106 | .134 | −.107 | .065 | (5) |
| T Tau N | T Tau | −.994 | .128 | −2.037 | .112 | .109 | .066 | (6) |
| V1201 Tau | T Tau | −.370 | .115 | −1.309 | .096 | −.197 | .083 | (5) |
| V807 Tau | T Tau | .986 | 1.237 | 8.544 | 1.009 | .935 | .667 | (5) |
| V1110 Tau | RS CVn | .438 | .112 | −.021 | .096 | −.281 | .154 | (5) |
| HIP 26233 | B2/3V | −1.421 | .404 | 1.311 | .409 | −2.196 | .187 | (8) |
| LSI +61 303 | BH | −.146 | .041 | .185 | .067 | – | – | (7) |
| DG Tau | T Tau | −.644 | .876 | −.197 | .932 | – | – | (9) |
| HD 118216 | F2+K2 | −.013 | .202 | −.031 | .164 | – | – | (10) |
| WR 112 | WR | .625 | 1.164 | 1.596 | 1.436 | – | – | (11) |
| WR 125 | WR | −.964 | .503 | .606 | .604 | – | – | (11) |
| WR 140 | WR | .377 | .206 | −.847 | .115 | – | – | (11) |
| WR 146 | WR | 2.284 | .696 | −1.375 | 2.242 | – | – | (11) |
| WR 147 | WR | −1.097 | .803 | −1.100 | 1.198 | – | – | (11) |
| PSR J0437–47 | Pulsar | 1.185 | 1.198 | .654 | 1.672 | 1.929 | .679 | (12) |
| V999 Tau | T Tau | −4.040 | .677 | −3.306 | .433 | 1.166 | .438 | (5) |
| HD 282630 | T Tau | .410 | .191 | .078 | .152 | −.798 | .148 | (5) |
| T Lep | Mira | −4.887 | .555 | 1.108 | .739 | −.101 | .193 | (13) |
| V1699 Ori | YSO | −.209 | .428 | −.144 | .399 | .062 | .267 | (8) |
| GMR G | YSO | −.048 | .139 | .745 | .188 | −.242 | .067 | (8) |
| GMR F | YSO | −.250 | .128 | .231 | .164 | −.048 | .074 | (8) |
| Parenago 1469 | YSO | .026 | .107 | −.047 | .120 | .013 | .049 | (8) |
| Parenago 1540 | PMS | .162 | .128 | .212 | .109 | −.096 | .063 | (8) |
| Parenago 1724 | YSO | .199 | .209 | .153 | .170 | −.078 | .057 | (8) |
| Parenago 1778 | YSO | .332 | .499 | .284 | .728 | −.116 | .312 | (8) |
| Parenago 1955 | YSO | −2.249 | .694 | −4.038 | 1.053 | −.594 | .215 | (8) |
| Parenago 2148 | YSO | 2.276 | .347 | .909 | .530 | .606 | .429 | (8) |

**Таблица 1.** Продолжение

| Звезда | Тип или спектр | $\Delta\mu_\alpha \cos\delta$, мсд/год | $\sigma_{\Delta\mu_\alpha \cos\delta}$, мсд/год | $\Delta\mu_\delta$, мсд/год | $\sigma_{\Delta\mu_\delta}$, мсд/год | $\Delta\pi$, мсд | $\sigma_{\Delta\pi}$, мсд | Ref |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V621 Ori | YSO | .475 | .463 | −.335 | .293 | .269 | .115 | (8) |
| HIP 26220 | HAe/Be | −3.274 | .187 | 2.653 | .184 | −.253 | .145 | (8) |
| HIP 26314 | B3III | .392 | .142 | .366 | .160 | .170 | .076 | (8) |
| RW Lep | Mira | 1.139 | .634 | −2.792 | .724 | .735 | .209 | (14) |
| HD 294300 | T Tau | 7.695 | .682 | −7.858 | 1.376 | −.514 | .373 | (8) |
| TYC 5346-538-1 | B8.1 | .147 | .171 | .188 | .290 | .045 | .091 | (8) |
| HD 290862 | B3/5 | −.607 | .291 | −1.482 | .836 | −.020 | .549 | (8) |
| U Lyn | Mira | −2.257 | .607 | −.297 | .602 | −.690 | .232 | (15) |
| R UMa | Mira | 1.436 | .551 | .691 | .517 | .075 | .208 | (16) |
| RT Vir | M8III | – | – | – | – | −2.367 | .320 | (17) |
| FV Boo | Mira | – | – | – | – | −.397 | .191 | (18) |
| S Crt | M6III | −.869 | .327 | .460 | .268 | .316 | .195 | (19) |
| R Cas | Mira | 1.400 | 2.384 | 1.660 | 1.786 | −.328 | 1.965 | (20) |
| RX Boo | M7.5/8 | −3.572 | 1.178 | 1.809 | 2.432 | .519 | .583 | (21) |
| S CrB | Mira | −1.671 | .526 | 1.172 | .467 | −.038 | .366 | (22) |
| U Her | Mira | −.261 | .360 | −.911 | .392 | −1.991 | .628 | (22) |
| WLY 2−11 | T Tau | 2.725 | .361 | −.388 | .301 | .231 | .181 | (23) |
| YLW 24 | T Tau | −.083 | .213 | .268 | .148 | −.143 | .166 | (23) |
| DoAr21 | T Tau | −.554 | .269 | .155 | .176 | .061 | .243 | (23) |
| rho Oph S1 | T Tau | −.120 | .254 | 3.163 | .167 | .917 | .145 | (23) |
| VSSG11 | T Tau | .739 | 1.118 | 14.217 | .776 | −.523 | .521 | (23) |
| DROXO 71 | PMS | −.799 | .640 | 1.376 | .525 | −.812 | .312 | (23) |
| SFAM 87 | T Tau | 1.143 | .142 | −2.653 | .111 | .345 | .115 | (23) |
| GWAYL 5 | T Tau | −1.188 | .568 | .532 | .428 | −.669 | .342 | (23) |
| DoAr51 | T Tau | −.396 | 1.071 | 1.572 | .726 | .265 | .387 | (23) |
| VX Sgr | RSG | 2.091 | .883 | 3.691 | .875 | .147 | .232 | (24) |
| [GFM2007] 11 | YSO | −.654 | .139 | .862 | .170 | −.072 | .109 | (25) |
| [GFM2007] 65 | YSO | 3.397 | 1.873 | 2.574 | 2.086 | −.780 | .852 | (25) |
| W 40 IRS 5 | B1 | .360 | .404 | −.487 | .360 | −.249 | .221 | (25) |
| W 40 IRS 1c | YSO | −3.102 | .892 | 2.848 | .752 | .840 | .476 | (25) |
| [KGF2010] 133 | YSO | −1.177 | .472 | −.881 | .520 | −.379 | .245 | (25) |
| PN K 3−35 | PN | .545 | .157 | 2.459 | .194 | .123 | .131 | (26) |
| RR Aql | Mira | 3.713 | .883 | 1.077 | .614 | 1.566 | .499 | (22) |
| Cyg X−1 | BH | −.102 | .077 | .229 | .132 | −.117 | .046 | (27) |
| IRAS 20126+4104 | YSO | −1.853 | .790 | −5.558 | .861 | .275 | .369 | (28) |
| IRAS 20143+3634 | YSO | −.123 | .193 | 1.447 | .454 | −.047 | .080 | (29) |

**Таблица 1.** Окончание

| Звезда | Тип или спектр | $\Delta\mu_\alpha \cos\delta$, мсд/год | $\sigma_{\Delta\mu_\alpha \cos\delta}$, мсд/год | $\Delta\mu_\delta$, мсд/год | $\sigma_{\Delta\mu_\delta}$, мсд/год | $\Delta\pi$, мсд | $\sigma_{\Delta\pi}$, мсд | Ref |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V404 Cyg | BH | −.729 | .176 | −.205 | .176 | .021 | .103 | (30) |
| HIP 101341 | O6.5+ | −1.443 | .985 | 3.075 | 1.282 | .028 | .227 | (31) |
| NML Cyg | RSG | 1.282 | 1.260 | 3.727 | 1.310 | .906 | .570 | (32) |
| UX Cyg | Mira | 3.381 | .810 | .254 | 1.621 | −.364 | .178 | (33) |
| SS Cyg | Df Nova | −.047 | .133 | .209 | .117 | −.076 | .130 | (34) |
| IRAS 22480+6002 | RSG | −.075 | .354 | −.250 | .212 | .079 | .082 | (35) |
| IM Peg | RS CVn | .111 | .164 | .419 | .159 | −.320 | .114 | (36) |
| R Aqr | M6.5e | −9.800 | .632 | −1.239 | .593 | −1.578 | .847 | (37) |
| PZ Cas | RSG | .590 | .232 | .192 | .320 | .064 | .085 | (38) |
| UX Ari | RS CVn | 5.089 | .525 | 2.111 | .411 | .443 | .452 | (39) |
| HR 1099 | RS CVn | −1.304 | .355 | −.082 | .332 | −.127 | .478 | (39) |
| HIP 79607 | RS CVn | −1.275 | .104 | −.265 | .154 | .205 | .119 | (39) |
| HD 199178 | G5III | −.277 | .415 | .498 | .435 | .312 | .332 | (39) |
| AR Lac | RS CVn | −.110 | .137 | .160 | .195 | −.537 | .371 | (39) |
| AM Her | polar | .063 | .223 | −.784 | .183 | .105 | .082 | (40) |
| W Hya | Mira | −7.533 | 2.418 | −4.408 | 3.234 | −4.089 | 2.497 | (20) |
| VY CMa | RSG | 3.726 | 1.865 | −9.074 | 1.847 | −6.772 | .827 | (41) |

**Примечание.** Mira — переменная типа Миры Кита; RSG — красный сверхгигант; RS CVn — переменная типа RS Гончих Псов; BY Dra — переменная типа BY Дракона; T Tau — переменная типа T Тельца; PMS — звезда, еще не дошедшая до главной последовательности; HAe/Be — звезда типа Ae/Be Хербига; YSO — молодой звездный объект; PN — планетарная туманность; Df Nova — карликовая новая; BH — один из компонентов системы является черной дырой; WR — звезда типа Вольфа-Райе. (1) — Ню и др. (2011); (2) — Асаки и др. (2010); (3) — Мелис и др. (2014); (4) — Торрес и др. (2012); (5) — Галли и др. (2018); (6) — Лойнард и др. (2007); (7) — Даван и др. (2006); (8) — Кункель и др. (2017); (9) — Ривера и др. (2015); (10) — Аббул и др. (2015); (11) — Дзиб, Родригес (2009); (12) — Деллер и др. (2008); (13) — Накагава и др. (2014); (14) — Камезаки и др. (2014); (15) — Камезаки и др. (2016a); (16) — Накагава и др. (2016); (17) — Женг и др. (2017); (18) — Камезаки и др. (2016б); (19) — Накагава и др. (2008); (20) — Влемингс и др. (2003); (21) — Камезаки и др. (2012); (22) — Влемингс и др. (2007); (23) — Ортиз-Леон и др. (2017a); (24) — Сю и др. (2018); (25) — Ортиз-Леон и др. (2017б); (26) — Тафойя и др. (2011); (27) — Рид и др. (2011); (28) — Сю и др. (2013); (29) — Барнс и др. (2014); (30) — Миллер-Джонс и др. (2009); (31) — Дзиб и др. (2013); (32) — Женг и др. (2012a); (33) — Кураяма и др. (2005); (34) — Миллер-Джонс и др. (2013); (35) — Имаи и др. (2012); (36) — Ратнер и др. (2012); (37) — Мин и др. (2014); (38) — Кусуно и др. (2013); (39) — Лестрэйд и др. (1999); (40) — Гавроньски и др. (2018); (41) — Женг и др. (2012b).

$\Delta\mu_\delta = 14.217 \pm 0.776$ мсд/год или VY CMa с $\Delta\pi = -6.772 \pm 0.827$ мсд. Отметим, что наличие длинного хвоста в распределении разностей положений радиоисточников установлено в работе Петрова и Ковалева (2017) при анализе большой выборки квазаров из каталога Gaia, имеющих РСДБ-измерения.

При сравнении оптических и радиоизображений звезд важную роль могут играть размер и характер радиоизлучающей области. Примером “хорошего”, симметричного радиоизображения может служить сверхгигант S Per. Как можно видеть из рис. 5 из работы Асаки и др. (2010), более 40 мазерных пятен довольно равномерно распределены в области радиусом около 50 мсд. А согласно рис. 10 цитируемой работы, векторы остаточных скоростей отлично указывают положение центра изображения. Как можно видеть из нашей таблицы, все значения разностей звезды S Per близки к нулю.

С другой стороны, радиоизлучение может быть ассоциировано с джетами, либо с обширными дисковыми структурами, окружающими радиозвезду. В таком случае велика вероятность появления значительного смещения при сравнении оптического и радиоизображения звезды.

Наконец, оптическое изображение радиозвезды тоже может быть несимметричным. Таким примером может служить известная звезда VY CMa. Это

красный сверхгигант, звезда обладает рекордным размером. Она фактически является предсверхновой, окружена туманностью, имеющей крайне несимметричную форму.

Все это приводит к необходимости при решении наших задач использования ограничений на величину исследуемых разностей. Величина таких ограничений была подобрана в результате нескольких итераций с целью исключения самых больших расхождений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Сравнение собственных движений*

Для определения трех угловых скоростей взаимного вращения двух систем вокруг экваториальных осей координат $\omega_x$, $\omega_y$, $\omega_z$ используем уравнения связи в следующей форме:

$$\Delta\mu_\alpha \cos\delta = -\omega_x \cos\alpha \sin\delta - \\ - \omega_y \sin\alpha \sin\delta + \omega_z \cos\delta, \\ \Delta\mu_\delta = +\omega_x \sin\alpha - \omega_y \cos\alpha, \quad (2)$$

где в левых частях уравнений находятся разности вида “Gaia минус РСДБ”. Используем разности собственных движений звезд, модули которых не превышают 6 мсд/год. Всего имеется 81 такая разность, их распределение дано на рис. 1.

Как можно видеть из таблицы, данные существенным образом неравноточные, поэтому систему условных уравнений вида (2) решаем как с единичными весами ($p = 1$), так и с весами, обратно пропорциональными ошибкам измерений

$$p = 1/\sqrt{\sigma^2_{\mu_{Gaia}} + \sigma^2_{\mu_{VLBI}}}, \quad (3)$$

где в знаменателе стоят (см. выражение (1)) величины дисперсий $\sigma_\Delta$, указанные в соответствующих колонках таблицы.

В результате решения системы из 162 условных уравнений вида (2) методом наименьших квадратов с единичными весами получены следующие скорости вращения:

$$\omega_x = -0.44 \pm 0.20 \text{ мсд/год}, \quad (4) \\ \omega_y = -0.05 \pm 0.29 \text{ мсд/год}, \\ \omega_z = -0.27 \pm 0.21 \text{ мсд/год}.$$

А с весами (3) получены следующие скорости вращения:

$$\omega_x = -0.14 \pm 0.15 \text{ мсд/год}, \quad (5) \\ \omega_y = +0.03 \pm 0.22 \text{ мсд/год}, \\ \omega_z = -0.33 \pm 0.16 \text{ мсд/год},$$

где по сравнению с решением (4) сильно уменьшилось значение $\omega_x$, уменьшились также ошибки определяемых параметров.

### *Сравнение параллаксов*

Для сравнения параллаксов используем 75 звезд, отобранных так, чтобы относительные ошибки параллаксов из каталога Gaia DR2 и ошибки РСДБ-параллаксов не превышали 50%.

Вначале по разностям параллаксов вида “Gaia–РСДБ” найдено среднее значение $\Delta\pi = -0.030 \pm \pm 0.073$ (0.404) мсд. Среднее вычислено с единичными весами, дана ошибка среднего, вычисленная по формуле $\sqrt{\sum (x - \overline{x})^2/n(n-1)}$, а в скобках указано значение дисперсии $\sigma = \sum (x - \overline{x})^2/n$ (здесь именно квадрат среднеквадратического отклонения). Затем вычислено средневзвешенное с весами (3)

$$\Delta\pi = -0.038 \pm 0.046 \ (0.156) \text{ мсд}, \quad (6)$$

где дана ошибка средневзвешенного, а в скобках дана соответствующая дисперсия. Видим, что сильно различаются значения ошибок и дисперсий. Объясняется этот эффект тем, что использованы существенно неоднородные данные. Уже из распределения разностей собственных движений звезд (рис. 1) видны очень широкие крылья распределения. А именно: а) центральное сгущение, которое можно описать гауссианой с маленькой дисперсией, б) широкие крылья, которые можно описать гауссианой с существенно большей дисперсией.

Эффект более отчетливо проявляется в распределении разностей параллаксов звезд. Гистограмма разностей 75 звезд дана на рис. 2а. На этом рисунке дана гауссиана с математическим ожиданием −0.30 мсд и дисперсией 0.40 мсд, которая плохо описывает распределение. Для описания такого распределения лучше бы подошли две гауссианы с существенно различающимися дисперсиями. Но мы поступили иначе. На рис. 2б для построения гистограммы использованы 49 звезд, которые были отобраны при ограничениях на ошибку разностей (см. (1) и таблицу): $\sigma_{\Delta\pi} < 0.25$ мсд. Теперь параметры найденной гауссианы (математическое ожидание −0.35 мсд и дисперсия 0.18 мсд) находятся в очень хорошем согласии с результатом (6). На основании этого мы заключаем, что применение весов вида (3) дает результат, адекватный имеющимся данным. Причем такой подход позволяет использовать весь массив имеющихся данных.

Для определения масштабного коэффициента $b$ составляем систему условных линейных уравнений вида

$$\pi_{Gaia} = a + b\pi_{VLBI}, \quad (7)$$

из решения которой можем оценить значения двух параметров $a$ и $b$. Как и прежде, используем 75 звезд с относительными ошибками параллаксов менее 50%. Решение системы условных уравнений

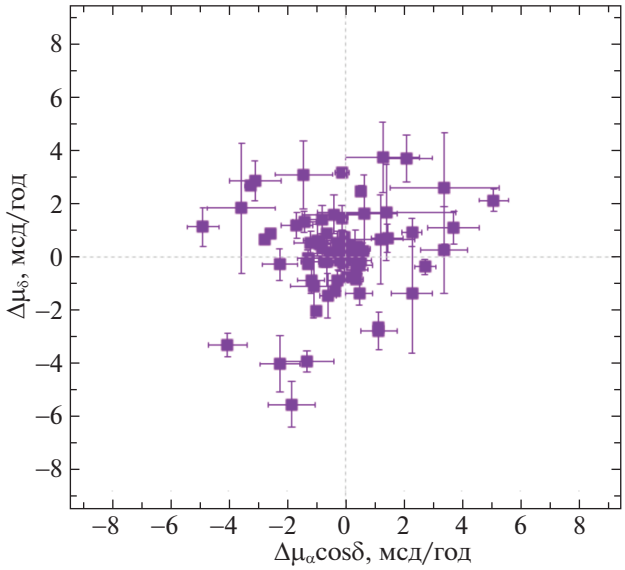


**Рис. 1.** Разности собственных движений звезд вида “Gaia–РСДБ”.

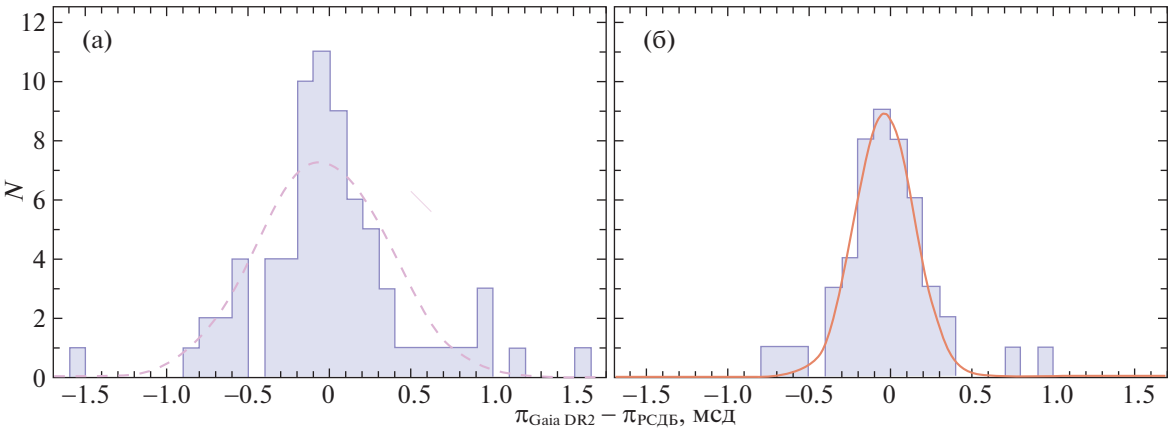


**Рис. 2.** Гистограмма разностей параллаксов вида “Gaia–РСДБ”, построенная по всем разностям, дана гауссиана с математическим ожиданием −0.30 мсд и дисперсией 0.40 мсд) (а), и построенная с ограничением на величину разности $\sigma_{\Delta\pi} < 0.25$ мсд, здесь гауссиана имеет математическим ожидание −0.35 мсд и дисперсию 0.18 мсд (б).

вида (7) методом наименьших квадратов с весами (3) дает следующий результат:

$$a = -0.048 \pm 0.059 \text{ мсд}, \qquad (8)$$
$$b = +1.002 \pm 0.007.$$

На рис. 3 даны параллаксы радиозвезд из каталога Gaia DR2 в зависимости от их РСДБ-параллаксов. Хорошо видно, что шкалы практически идентичны в окрестности Солнца радиусом около 3 кпк. И только на бóльших расстояниях шкала параллаксов Gaia DR2 становится длиннее по сравнению с РСДБ-параллаксами.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В работе Лая и др. (2017) была изучена система каталога Gaia DR1 (Браун и др., 2016). В частности, проведено сравнение версии TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution) с каталогом Tycho2 (Xer и др., 2000) и уточненной ван Лювеном (2007) версии каталога HIPPARCOS (1997) с использованием модели твердотельного вращения (2). По разностям собственных движений около 87 000 звезд вида “HIPPARCOS–TGAS” эти авторы нашли следующие значения компонент вектора вращения: $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0.008, 0.010, -0.014) \pm$ $\pm\,(0.007, 0.007, 0.009)$ мсд/год, а по разностям

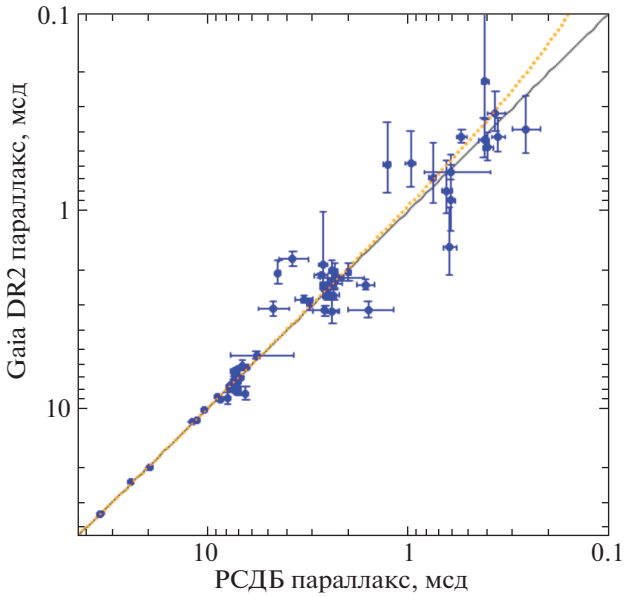


**Рис. 3.** Параллаксы радиозвезд из каталога Gaia DR2 в зависимости от их параллаксов, измеренных средствами РСДБ, сплошная линия соответствует корреляции с коэффициентом 1, пунктирная линия соответствует решению (8).

собственных движений около 2 млн звезд вида "Tycho2–TGAS" следующие значения: $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0.011, 0.013, 0.024) \pm (0.004, 0.004, 0.005)$ мсд/год. Таким образом, Лай и др. (2017) показали отсутствие значимых взаимных вращений между этими системами.

Однако Лай и др. (2017) на основе модели Огородникова–Милна выполнили кинематический анализ около 23 000 гигантов спектральных классов K–M из каталога TGAS и нашли ненулевые компоненты, указывающие на возможное остаточное вращение в системе Gaia DR1 или на наличие проблем в кинематической модели. Найденные скорости имеют следующие значения: $\omega_{Y_G} = -0.38 \pm 0.15$ мсд/год и $\omega'_{Y_G} = -0.29 \pm \pm 0.19$ мсд/год, которые интерпретируются как дополнительное вращение вокруг галактической оси $Y$.

Отметим работу Федорова и др. (2017), в которой из сравнения собственных движений звезд из каталога Gaia DR1 с рядом наземных каталогов на основе модели (2) было обнаружено, что сильно меняется значение скорости $\omega_y$ от $+0.5$ мсд/год до $-1.5$ мсд/год в зависимости от звездной величины. В нашем случае (5) эта скорость мала $\omega_y = 0.03 \pm \pm 0.22$ мсд/год.

Отметим, наконец, работу Линдегрена и др. (2018), где обсуждается остаточное вращение системы Gaia DR2 относительно системы ICRS. Согласно рис. 4 из цитируемой работы, можно указать на следующие средние значения скоростей такого вращения $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0.2, 0.0, -0.2)$ мсд/год, которые были найдены из сравнения собственных движений ярких звезд TGAS и Gaia DR2, а также из анализа собственных движений квазаров для слабых объектов. Было использовано большое количество звезд, поэтому случайные ошибки определения этих параметров малы, имеют уровень менее 10%. Из этого рисунка хорошо видна зависимость скоростей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ от звездной величины. Например, для $G \approx 10^m$, характерную для звезд рассматриваемой в настоящей работе выборки, будем иметь $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0.1, -0.1, -0.25)$ мсд/год. Видим хорошее согласие этих значений с оценками настоящей работы (5).

Как уже было отмечено во Введении, из сравнения с данными каталога Gaia DR2 89 разделенных затменно-двойных звезд Стассун и Торрес (2018) нашли поправку $\Delta\pi = -0.082 \pm 0.033$ мсд. Здесь дисперсию гауссианы 0.033 мсд необходимо сравнивать с полученным нами значением 0.156 мсд в решении (6). Эти звезды интересны тем, что отбор был осуществлен по литературным данным с использованием очень строгих критериев, предъявляемых к фотометрическим характеристикам. В итоге относительные ошибки определения звездных радиусов, эффективных температур и болометрической светимости (по которой оценивается расстояние) не превышают 3%. Спектральные типы звезд в этой выборке лежат в широком диапазоне от поздних O до M, большинство звезд

принадлежат главной последовательности, имеются и несколько гигантов. Согласно этим авторам (Стассун, Торрес, 2016), относительные ошибки параллаксов затменно-двойных в среднем не превышают 5% и не зависят от расстояния.

Риссом и др. (2018) оценка $\Delta\pi = -0.046 \pm \pm 0.013$ мсд была получена по выборке из 50 долгопериодических цефеид при сравнении их параллаксов с параллаксами из каталога Gaia DR2. Использовались фотометрические характеристики этих цефеид, измеренные с борта космического телескопа им. Хаббла. Интересно отметить, что относительно высокоточной калибровочной шкалы Рисса и др. (2016), в которой относительные ошибки расстояния до цефеид составляют 1–2%, эти авторы определили значение масштабного коэффициента $b = 1.006 \pm 0.033$, которое мало отличается от найденного нами в решении (8).

Можно ожидать, что в систематическом отношении параллаксы звезд из каталогов Gaia DR1 и DR2 не сильно различаются. Например, в работе Бобылева, Байковой (2018) по результатам кинематического анализа звезд из каталога Gaia TGAS был сделан вывод о том, что расстояния до них, вычисленные с использованием их тригонометрических параллаксов, не требуют использования какого-либо дополнительного корректировочного множителя. Такой вывод подтверждается и настоящим исследованием в отношении параллаксов звезд из каталога Gaia DR2.

В работе Зинна и др. (2018) из сравнения расстояний около 3000 гигантов из каталога APOKAS-2 (Пинсонью и др., 2018) с данными каталога Gaia DR2 найдено $\Delta\pi = -0.053 \pm \pm 0.002$ мсд. Оценки расстояний до этих звезд, принадлежащих сгущению красных гигантов, были вычислены по астросейсмическим данным. Согласно этим авторам здесь ошибки определения параллаксов примерно равны ошибкам оценивания радиуса звезды, и в среднем составляют 1.5%. Такие маленькие ошибки в сочетании с огромным количеством звезд позволили определить значение $\Delta\pi$ с высокой точностью.

Значительную часть нашей выборки составляют молодые звезды из области пояса Гулда, расстояния до которых измерены методом РСДБ. В работе Кункель и др. (2018) по данным о 55 таких звездах (все они представлены в нашей таблице как PMS, YSO и T Tau) на основе соотношения (7) найдены следующие параметры: $a = -0.073 \pm 0.034$ мсд и $b = +0.9947 \pm 0.0066$. Значения этих параметров находятся в очень хорошем согласии с нашими оценками (8).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По литературным данным сформирована выборка из 88 радиозвезд, для которых имеются измерения тригонометрических параллаксов как в каталоге Gaia DR2, так и РСДБ-измерения.

Из анализа разностей тригонометрических параллаксов радиозвезд вида “Gaia–РСДБ” получена новая оценка систематического смещения между оптической и радиосистемами параллаксов $\Delta\pi = -0.038 \pm 0.046$ (0.156) мсд. Если считать РСДБ-параллаксы более точными, то к значениям параллаксов из каталога Gaia DR2 необходимо прибавить найденную поправку. В этом случае расстояния до звезд, вычисленные по исправленным параллаксам Gaia DR2, слегка уменьшатся, то есть звезды станут более близкими к Солнцу.

Уверенно определяется коэффициент масштаба $b$, значение которого отличается от 1 не более чем на 1%. Такая ситуация наблюдается в окрестности Солнца радиусом 3 кпк. И только на бóльших расстояниях шкала параллаксов Gaia DR2 немного растянута по сравнению с РСДБ-параллаксами.

По разностям собственных движений радиозвезд вида “Gaia–РСДБ” на основе модели твердотельного взаимного вращения определены компоненты вектора вращения в экваториальной системе координат, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = = (-0.14, 0.03, -0.33) \pm (0.15, 0.22, 0.16)$ мсд/год.

Автор благодарен рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи. Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН П–28, подпрограмма “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббул и др. (E. Abbuhl, R.L. Mutel, C. Lynch, and M. Guedel), Astrophys. J. **811**, 33 (2015).
2. Асаки и др. (Y. Asaki, S. Deguchi, H. Imai, K. Hachisuka, M. Miyoshi, and M. Honma), Astrophys. J. **721**, 267 (2010).
3. Барнс и др. (R.A. Burns, Y. Yamaguchi, T. Handa, T. Omodaka, T. Nagayama, A. Nakagawa, M. Hayashi, T. Kamezaki, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan **66**, 102 (2014).
4. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **41**, 177 (2015) [V.V. Bobylev, Astron. Lett. **41**, 156 (2015)].
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 210 (2018) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. **44**, 184 (2018)].
6. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, et al.), Astron. Astrophys. **595**, A2 (2016).

7. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 1 (2018).
8. Влемингс и др. (W.H.T. Vlemmings, H.J. van Langevelde, P.J. Diamond, H.J. Habing, and R.T. Schilizzi), Astron. Astrophys. **407**, 213 (2003).
9. Влемингс, Лангевельде (W.H.T. Vlemmings, and H.J. van Langevelde), Astron. Astrophys. **472**, 547 (2007).
10. Гавроньски и др. (M.P. Gawroński, K. Goździewski, K. Katarzyński, and G. Rycyk), Mon. Not. R. Astron. Soc. **475**, 1399 (2018).
11. Галли и др. (P.A.B. Galli, L. Loinard, G.N. Ortiz-Léon, M. Kounkel, S.A. Dzib, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, L. Hartmann, et al.), Astrophys. J. **859**, 33 (2018).
12. Даван и др. (V. Dhawan, A. Mioduszewski, and M. Rupen), Proc. VI Microquasar Workshop: Microquasars and Beyond. September 18–22, 2006, Como, Italy, p. 52.1 (2006).
13. Деллер и др. (A.T. Deller, J.P.W. Verbiest, S.J. Tingay, and M. Bailes), Astrophys. J. **685**, L67 (2008).
14. Дзиб, Родригес (S.A. Dzib and L.F. Rodríguez), Revista Mexicana Astron. Astrofis. **45**, 3 (2009).
15. Дзиб и др. (S.A. Dzib, L.F. Rodríguez, L. Loinard, A.J. Mioduszewski, G.N. Ortiz-León, and A.T. Araudo), Astrophys. J. **763**, 139 (2013).
16. Дзиб и др. (S. Dzib, L. Loinard, L.F. Rodríguez, A.J. Mioduszewski, G.N. Ortiz-Leon, M.A. Kounkel, G. Pech, J.L. Rivera, et al.), Astrophys. J. **801**, 91 (2015).
17. Жао и др. (W.-C. Jao, T.J. Henry, A.R. Riedel, J.G. Winters, K.J. Slatten, and D.R. Gies), Astrophys. J. Lett. **832**, L18 (2016).
18. Женг и др. (B. Zhang, M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, and A. Brunthaler), Astron. Astrophys. **544**, 42 (2012a).
19. Женг и др. (B. Zhang, M.J. Reid, K.M. Menten, and X.W. Zheng), Astrophys. J. **744**, 23 (2012b).
20. Женг и др. (B. Zhang, X. Zheng, M.J. Reid, M. Honma, K.M. Menten, A. Brunthaler, and J. Kim), Astrophys. J. **849**, 99 (2017).
21. Зинн и др. (J.C. Zinn, M.H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello), arXiv: 1805.02650 (2018).
22. Имаи и др. (H. Imai, N. Sakai, H. Nakanishi, H. Sakanoue, M. Honma, and T. Miyaji), Publ. Astron. Soc. Japan **64**, 142 (2012).
23. Казертано и др. (S. Casertano, A.G. Riess, B. Bucciarelli, and M.G. Lattanzi), Astron. Astrophys. **599**, 67 (2017).
24. Камезаки и др. (T. Kamezaki, A. Nakagawa, T. Omodaka, T. Kurayama, H. Imai, D. Tafoya, M. Matsui, and Y. Nishida), PASJ **64**, 7 (2012).
25. Камезаки и др. (T. Kamezaki, T. Kurayama, A. Nakagawa, T. Handa, T. Omodaka, T. Nagayama, H. Kobayashi, and M. Shizugami), Publ. Astron. Soc. Japan **66**, 107 (2014).
26. Камезаки и др. (T. Kamezaki, A. Nakagawa, T. Omodaka, T. Handa, K.-I. Inoue, T. Kurayama, H. Kobayashi, T. Nagayama, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan **68**, 71 (2016a).
27. Камезаки и др. (T. Kamezaki, A. Nakagawa, T. Omodaka, K.-I. Inoue, J.O. Chibueze, T. Nagayama, Y. Ueno, and N. Matsunaga), Publ. Astron. Soc. Japan **68**, 75 (2016б).
28. Ким и др. (M.K. Kim, T. Hirota, M. Honma, H. Kobayashi, T. Bushimata, Y.K. Choi, H. Imai, K. Iwadate, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan **60**, 991 (2008).
29. Кункель и др. (M. Kounkel, L. Hartmann, L. Loinard, G.N. Ortiz-Leon, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, R.M. Torres, G. Pech, et al.), Astrophys. J. **834**, 142 (2017).
30. Кункель и др. (M. Kounkel, K. Covey, G. Suarez, C. Román-Zúñiga, J. Hernandez, K. Stassun, K.O. Jaehnig, E. Feigelson, et al.), Astron. J. **156**, 84 (2018).
31. Кураяма и др. (T. Kurayama, T. Sasao, and H. Kobayashi), Astrophys. J. **627**, L49 (2005).
32. Кусуно и др. (K. Kusuno, Y. Asaki, H. Imai, and T. Oyama), Astrophys. J. **774**, 107 (2013).
33. Лай и др. (N. Liu, Z. Zhu, J.-C. Liu, and C.-Y. Ding), Astron. Astrophys. **599**, 140 (2017).
34. Лестрэйд и др. (J.-F. Lestrade, R.A. Preston, D.L. Jones, R.B. Phillips, A.E.E. Rogers, M.A. Titus, M.J. Rioja, and D.C. Gabuzda), Astron. Astrophys. **344**, 1014 (1999).
35. Лойнард и др. (L. Loinard, R.M. Torres, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, R.A. Gonzalez-Lopezlira, R. Lachaume, V. Vazquez, and E. Gonzalez), Astrophys. J. **671**, 546 (2007).
36. Линдегрен и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmuller, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 2 (2018).
37. Ван Лювен (F. van Leeuwen), Astron. Astrophys. **474**, 653 (2007).
38. Мелис и др. (C. Melis, M.J. Reid, A.J. Mioduszewski, J.R. Stauffer, and G.C. Bower), Science **345**, 1029 (2014).
39. Миллер-Джонс и др. (J.C.A. Miller-Jones, P.G. Jonker, V. Dhawan, W. Brisken, M.P. Rupen, G. Nelemans, and E. Gallo), Astrophys. J. **706**, 230 (2009).
40. Миллер-Джонс и др. (J.C.A. Miller-Jones, G.R. Sivakoff, C. Knigge, E.G. Kording, M. Templeton, and E.O. Waagen), Science **340**, 950 (2013).
41. Мин и др. (C. Min, N. Matsumoto, M.K. Kim, T. Hirota, K.M. Shibata, S.-H. Cho, M. Shizugami, and M. Honma), Publ. Astron. Soc. Japan **66**, 38 (2014).
42. Миньяр и др. (Gaia Collaboration, F. Mignard, S.A. Klioner, L. Lindegren, J. Hernández, U. Bastian, A. Bombrun, D. Hobbs, U. Lammers, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 14 (2018).

43. Накагава и др. (A. Nakagawa, M. Tsushima, K. Ando, T. Bushimata, Y.K. Choi, T. Hirota, M. Honma, H. Imai, et al.), PASJ **60**, 1013 (2008).
44. Накагава и др. (A. Nakagawa, T. Omodaka, T. Handa, M. Honma, N. Kawaguchi, H. Kobayashi, T. Oyama, K. Sato, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan **66**, 101 (2014).
45. Накагава и др. (A. Nakagawa, T. Kurayama, M. Matsui, T. Omodaka, M. Honma, K.M. Shibata, K. Sato, end T. Jike), Publ. Astron. Soc. Japan **66**, 101 (2016).
46. Ню и др. (D. Nyu, A. Nakagawa, M. Matsui, H. Imai, Y. Sofue, T. Omodaka, T. Kurayama, R. Kamohara, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan **63**, 53 (2011).
47. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-Leon, L. Loinard, M.A. Kounkel, S.A. Dzib, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, R.M. Torres, R.A. González-López lira, et al.), Astrophys. J. **834**, 141 (2017a).
48. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-Leon, S.A. Dzib, M.A. Kounkel, L. Loinard, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, R.M. Torres, G. Pech, et al.), Astrophys. J. **834**, 143 (2017б).
49. Петров, Ковалев (L. Petrov and Y.Y. Kovalev), Mon. Not. R. Astron. Soc. **467**, 71 (2017).
50. Пинсонью и др. (M.H. Pinsonneault, Y.P. Elsworth, J. Tayar, A. Serenelli, D. Stello, J. Zinn, S. Mathur, R. Garcia, et al.), arXiv: 1804.09983, (2018).
51. Прадель и др. (N. Pradel, P. Charlot, and J.-F. Lestrade), Astron. Astrophys. **452**, 1099 (2006).
52. Прусти 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).
53. Ратнер и др. (M.I. Ratner, N. Bartel, M.F. Bietenholz, D.E. Lebach, J.-F. Lestrade, R.R. Ransom, and I.I. Shapiro), Astrophys. J. Suppl. Ser. **201**, 5 (2012).
54. Ривера и др. (J.L. Rivera, L. Loinard, S.A. Dzib, G.N. Ortiz-Leon, L.F. Rodriguez, and R. M. Torres), Astrophys. J. **807**, 119 (2015).
55. Ригл и др. (K.L.J. Rygl, A. Brunthaler, M.J. Reid, K.M. Menten, H.J. van Langevelde, and Y. Xu), Astron. Astrophys. **511**, 2 (2010).
56. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, A. Brunthaler, L. Moscadelli, Y. Xu, B. Zhang, M. Sato, et al.), Astrophys. J. **700**, 137 (2009).
57. Рид и др. (M.J. Reid, J.E. McClintock, R. Narayan, L. Gou, R.A. Remillard, and J.A. Orosz), Astrophys. J. **742**, 83 (2011).
58. Рисс и др. (A.G. Riess, L. Macri, S.L. Hoffmann, D. Scolnic, S. Casertano, A.V. Filippenko, B.E. Tucker, M.J. Reid, et al.), Astrophys. J. **826**, 56 (2016).
59. Рисс и др. (A.G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. Macri, B. Bucciarelli, M.G. Lattanzi, J.W. MacKenty, J.B. Bowers, et al.), Astrophys. J. **861**, 126 (2018).
60. Стассун, Торрес (K.G. Stassun and G. Torres), Astrophys. J. Lett. **831**, L6 (2016).
61. Стассун, Торрес (K.G. Stassun and G. Torres), Astrophys. J. **862**, 61 (2018).
62. Сю и др. (S. Xu, B. Zhang, M.J. Reid, K.M. Menten, X. Zheng, and G. Wang), Astrophys. J. **859**, 14 (2018).
63. Тафойя и др. (D. Tafoya, H. Imai, Y. Gomez, J.M. Torrelles, N.A. Patel, G. Anglada, L.F. Miranda, M. Honma, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan **63**, 71 (2011).
64. Торрес и др. (R.M. Torres, L. Loinard, A.J. Mioduszewski, A.F. Boden, R. Franco-Hernandez, W.H.T. Vlemmings, and L.F. Rodriguez), Astrophys. J. **747**, 18 (2012).
65. Федоров и др. (P.N. Fedorov, V.S. Akhmetov, and A.B. Velichko), Mon. Not. R. Astron. Soc. **476**, 2743 (2017).
66. Хег и др. (E. Høg, C. Fabricius, V.V. Makarov, S. Urban, T. Corbin, G. Wycoff, U. Bastian, P. Schwekendiek, and A. Wicenec), Astron. Astrophys. **355**, L27 (2000).
67. Хирота и др. (T. Hirota, T. Bushimata, Y.K. Choi, M. Honma, H. Imai, I. Hiroshi, K. Iwadate, T. Jike, et al.), Publ. Astron. Soc. Japan **60**, 37 (2008).
68. Хубер и др. (D. Huber, J. Zinn, M. Bojsen-Hansen, M. Pinsonneault, C. Sahlholdt, A. Serenelli, V.S. Aguirre, K. Stassun, et al.), Astrophys. J. **844**, 102 (2017).
69. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).