

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С ДАННЫМИ ИЗ КАТАЛОГА GAIA DR2

© 2019 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

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

Поступила в редакцию 08.12.2018 г.; после доработки 21.01.2019 г.; принята к публикации 29.01.2019 г.

Рассмотрены рассеянные звездные скопления (РЗС) с собственными движениями, параллаксами и лучевыми скоростями, вычисленными различными авторами по данным каталога Gaia DR2. Из анализа отдельных решений основных кинематических уравнений найден коэффициент шкалы расстояний $p = 1.00 \pm 0.04$, показывающий, что вычисленные с использованием параллаксов из каталога Gaia DR2 расстояния не нуждаются в каком-либо поправочном множителе. Исследованы решения, полученные по различным выборкам РЗС, отличающимся как возрастом, так и точностью измерения их параллаксов и лучевых скоростей. Наилучшим признано решение, полученное по выборке из 930 РЗС, удовлетворяющей ограничениям на возраст $\lg t < 9.0$ и относительные ошибки тригонометрических параллаксов $< 30\%$. Причем 384 РЗС, входящие в эту выборку, имеют средние лучевые скорости, вычисленные не менее чем по 3 вероятным членам соответствующих скоплений. В результате совместного решения всех основных кинематических уравнений, по этой выборке найдены следующие значения кинематических параметров: $(U, V, W)_{\odot} = (8.53, 11.22, 7.83) \pm (0.38, 0.46, 0.32)$ км/с, $\Omega_0 = 28.71 \pm 0.22$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.100 \pm 0.058$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.736 \pm 0.033$ км/с/кпк³. Линейная скорость вращения на принятом солнечном расстоянии $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк составила $V_0 = 229.7 \pm 4.6$ км/с. Анализ собственных движений этих 930 РЗС показал, что, помимо вращения вокруг галактической оси z , имеется значимо отличающееся от нуля вращение всей выборки вокруг оси x с угловой скоростью 0.48 ± 0.15 км/с/кпк.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, лучевые скорости, собственные движения, расстояния, вращение Галактики.

DOI: 10.1134/S0320010819040028

ВВЕДЕНИЕ

При изучении Галактики и ее подсистем важную роль играют рассеянные звездные скопления (РЗС), так как они имеют высокую точность средних значений ряда кинематических и фотометрических характеристик. Здесь большое значение играет точность как расстояний, собственных движений, так и лучевых скоростей РЗС.

В 2018 г. был опубликован каталог Gaia DR2 (Браун и др., 2018; Линдегрен и др., 2018), содержащий тригонометрические параллаксы и собственные движения около 1.7 млрд звезд. Средние ошибки параллаксов ярких ($G < 15^m$) звезд лежат в интервале 0.02–0.04 миллисекунд дуги (мсд), а у слабых ($G = 20^m$) звезд они достигают 0.7 мсд. Для более 7 млн звезд спектральных классов F–G–K измерены лучевые скорости со средней ошибкой около 1 км/с.

Использование этих новейших данных имеет важное значение для изучения кинематики звезд и скоплений. На их основе уже уточнены структурные и кинематические параметры большого количества РЗС (Бабиссо и др., 2018; Кун и др., 2018; Кантат-Гудин и др., 2018), проанализированы свойства ряда близких к Солнцу молодых звездных ассоциаций (Зари и др., 2018; Франциосини и др., 2018; Роккатаглиата и др., 2018; Кункель и др., 2018) и РЗС (Субиран и др., 2018; Диас и др., 2018), обнаружены новые РЗС (Беккари и др., 2018). Интересно также отметить недавний обзор Крумхольца и др. (2018), в котором отражено современное состояние исследований в области длительной эволюции скоплений.

В работе Бобылева, Байковой (2019) был выполнен анализ кинематики РЗС с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами, вычисленными по данным каталога Gaia DR2, где средние значения лучевых скоростей

* Электронный адрес: vbobylev@gao.spb.ru

скоплений были взяты в основном из каталога MWSC (Milky Way Star Clusters, Харченко и др., 2013). Недавно был опубликован каталог Субиран и др. (2018), где новые средние значения лучевых скоростей вычислены исключительно по каталогу Gaia DR2. Представляет большой интерес использование этих данных для определения параметров вращения Галактики и для решения других звездно-астрономических задач.

Настоящая работа является продолжением исследования Бобылева, Байковой (2019) на основе новых средних значений лучевых скоростей РЗС, при этом большое внимание уделяется изучению качества новых лучевых скоростей РЗС, качества шкалы расстояний и систематики каталога Gaia DR2.

МЕТОД

Из наблюдений нам известны три составляющие скорости звезды: лучевая 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 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 миллисекундах дуги в год (мсд/год). Для определения параметров кривой галактического вращения мы используем уравнения, полученные из формул Боттлингера, в которых проведено разложение угловой скорости Ω в ряд до членов второго порядка малости r/R_0 :

$$V_r = -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l - W_\odot \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \quad (1)$$

$$V_l = U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r\Omega_0 \cos b + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega'_0 + 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega''_0 - r \cos l \sin b \omega_1 - r \sin l \sin b \omega_2, \quad (2)$$

$$V_b = U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - W_\odot \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0 + r \sin l \omega_1 - r \cos l \omega_2. \quad (3)$$

Здесь R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики:

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (4)$$

Величина Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные этой угловой скорости, линейная скорость вращения Галактики равна $V_0 = |R_0 \Omega_0|$.

Известно, что на кривой вращения Галактики, параметры которой определяются по достаточно молодым объектам диска, наблюдается (см., например, Расторгуев и др., 2017) периодическая составляющая с длиной волны 2–3 кпк, что связано с влиянием галактической спиральной волны плотности. Поэтому на первом этапе удобно иметь гладкую кривую вращения Галактики (которая и обеспечивается разложением угловой скорости вращения до второго порядка), а затем влияние возмущений от спиральной волны плотности изучать отдельно. Такой подход применялся в работах Бобылева, Байковой (2018б, 2019).

Помимо вращения вокруг галактической оси z (описывается параметром Ω), в настоящей работе рассматриваем также угловые скорости вращения вокруг оси x и y , которые описываются параметрами ω_1 и ω_2 соответственно. Отметим, что параметры ω_1 и ω_2 можно найти только из уравнений вида (2) и (3). В нашем списке большую часть составляют молодые РЗС, принадлежащие тонкому диску и имеющие маленькие значения $\sin b$. Применение уравнения (3) малоэффективно при поиске Ω'_0 и Ω''_0 по молодым объектам. Однако при поиске параметров ω_1 и ω_2 именно уравнение (3) представляет большой интерес, так как здесь при этих двух неизвестных нет множителя $\sin b$.

Известен ряд современных работ, посвященных определению среднего значения расстояния от Солнца до центра Галактики с использованием индивидуальных определений этой величины, полученных в последнее десятилетие независимыми методами. Например, $R_0 = 8.0 \pm 0.2$ кпк (Валле, 2017), $R_0 = 8.4 \pm 0.4$ кпк (де Грийс, Боно, 2017) или $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк (Камарильо и др., 2018). На основе этих обзоров в настоящей работе принято значение $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк.

Кинематические параметры определяются в результате решения условных уравнений вида (1)–(3) методом наименьших квадратов (МНК). Используются веса вида $w_r = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_r}^2}$ и $w_l = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_l}^2}$, где S_0 — “космическая” дисперсия, σ_{V_r} и σ_{V_l} — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение S_0 сопоставимо со среднеквадратической невязкой σ_0 (ошибка единицы веса), которая вычисляется при решении условных уравнений вида (1)–(3). Значение S_0 сильно зависит от возраста объектов, в настоящей работе мы ее назначаем близкой к значению, соответствующей заранее найденной ошибке

единицы веса σ_0 . Поиск МНК-решений осуществлялся в две итерации с исключением невязок по критерию трех сигм.

ДАННЫЕ

Собственные движения и лучевые скорости P3C

Основным источником средних значений собственных движений и параллаксов, вычисленных по данным каталога Gaia DR2, для нас послужила работа Кантат-Гудина и др. (2018), в которой эти величины определены для 1229 P3C. Параметры еще нескольких P3C взяты из работы Бабиссо и др. (2018), где они были вычислены только по данным каталога Gaia DR2, причем по большому количеству наиболее вероятных членов скоплений.

Средние значения гелиоцентрических лучевых скоростей 953 P3C взяты нами из каталога MWSC (Харченко и др., 2013), а в ряде случаев — из работ Куна и др. (2018), Бабиссо и др. (2018), Касамикелы и др. (2016), Конрад и др. (2014), а также Мермийо и др. (2008). Кроме того, мы использовали лучевые скорости 861 P3C, вычисленные Субиран и др. (2018) исключительно по данным каталога Gaia DR2.

Значительное количество P3C с лучевыми скоростями являются общими между MWSC и Субиран и др. (2018). Как показало сравнение этих и других каталогов, выполненное в работе Субиран и др. (2018), качество лучевых скоростей P3C, вычисленных по данным каталога Gaia DR2, очень сильно зависит от количества использованных для усреднения звезд в каждом скоплении. Имеются значительные расхождения с другими измерениями. Так, в отдельных случаях разности лучевых скоростей $|\Delta V_r|$ могут превышать 50 км/с (рис. 5 в работе Субиран и др., 2018). Тем не менее Субиран и др. выделили около 400 P3C с высоким качеством лучевых скоростей (их средняя ошибка составляет 0.5 км/с), вычисленных в среднем по семи звездам.

В работе Бобылева, Байковой (2019) были определены параметры вращения Галактики и спиральной волны плотности по выборке молодых P3C из каталога Кантат-Гудин и др. (2018), где использовались значения лучевых скоростей исключительно из каталога MWSC. В настоящей работе мы отдаем предпочтение лучевым скоростям из работы Субиран и др. (2018). Таким образом, только в случае отсутствия лучевой скорости в списке Субиран и др. (2018) берем значение из каталога MWSC.

Оценки возраста подавляющего большинства P3C взяты из каталога MWSC (Харченко и др., 2013). В единичных случаях привлечены оценки из электронной базы данных WEBDA

(<https://www.univie.ac.at/webda/>). Оценок возраста не имеют менее 100 P3C, 60 из них — недавно открытые скопления Gulliver (Кантат-Гудин и др., 2018).

В настоящей работе в общей сложности рассматриваются P3C с относительными ошибками параллаксов $\sigma_\pi/\pi < 30\%$, где значения дисперсий σ_π взяты из 109-го столбца каталога Кантат-Гудин и др. (2018). Всего имеется 1052 таких P3C различного возраста с собственными движениями и параллаксами, а 863 из них имеют еще и оценки лучевой скорости.

Поправка к параллаксам каталога Gaia DR2

Впервые Линдегеном и др. (2018) отмечено наличие систематического сдвига $\Delta\pi = -0.029$ мсд в параллаксах Gaia DR2 по отношению к инерциальной системе координат. Знак минус означает, что поправку необходимо прибавить к параллаксам звезд Gaia DR2 для приведения их к эталону. В работе Арену и др. (2018) даны результаты сравнения параллаксов Gaia DR2 с 29 независимыми шкалами расстояний, которые подтверждают наличие смещения в параллаксах Gaia DR2 $\Delta\pi \sim -0.03$ мсд.

Стассун и Торрес (2018) нашли поправку $\Delta\pi = -0.082 \pm 0.033$ мсд в результате сравнения параллаксов 89 разделенных затменно-двойных звезд с их тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR2.

В работе Ялялиевой и др. (2018) из сравнения тригонометрических параллаксов Gaia DR2 и фотометрических параллаксов 94 P3C найдена поправка $\Delta\pi = -0.045 \pm 0.009$ мсд. Высокая точность найденной оценки обусловлена высокой точностью оценок фотометрических расстояний до P3C, полученных с привлечением первоклассных фотометрических обзоров в инфракрасной области спектра, таких как IPHAS, 2MASS, WISE и Pan-STARRS.

Риссом и др. (2018) оценка $\Delta\pi = -0.046 \pm 0.013$ 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.

В работе Зинна и др. (2018) из сравнения расстояний около 3000 звезд из каталога APOKAS-2 (Пинсонью и др., 2018), принадлежащих ветви красных гигантов, с данными каталога Gaia DR2 найдена поправка $\Delta\pi = -0.053 \pm 0.003$ мсд. Близкая величина, $\Delta\pi = -0.050 \pm 0.004$ мсд, получена также этими авторами из анализа звезд, принадлежащих сгущению красных гигантов. Оценки

Таблица 1. Параметры вращения Галактики, найденные только по лучевым скоростям V_r (уравнение (1)) по РЗС различных возрастов с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15%

Параметры	Все возрасты	$0 < \lg t \leq 8$	$8 < \lg t \leq 9$	$9 < \lg t$
U_{\odot} , км/с	11.4 ± 0.8	10.7 ± 1.4	11.7 ± 1.1	11.9 ± 3.3
V_{\odot} , км/с	13.1 ± 0.8	13.4 ± 1.5	13.0 ± 1.2	13.1 ± 3.2
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.97 ± 0.10	-3.85 ± 0.19	-4.05 ± 0.14	-3.85 ± 0.38
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.45 ± 0.088	0.49 ± 0.23	0.57 ± 0.13	0.27 ± 0.21
σ_0 , км/с	15.4	14.2	13.5	20.4
N_*	856	273	434	110

Примечание. N_* — количество использованных скопления.

расстояний до таких звезд, 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.

Перечисленные результаты позволяют заключить, что необходимо исправлять тригонометрические параллаксы звезд из каталога Gaia DR2 небольшой поправкой. Мы будем ориентироваться на результаты Ялялиевой и др. (2018), Рисса и др. (2018) и Зинна и др. (2018), которые выглядят наиболее достоверными. Таким образом, мы прибавляем ко всем оригинальным параллаксам РЗС поправку 0.050 мсд.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 даны кинематические параметры, полученные в результате решения уравнений (1) для различных возрастных групп. Отметим, что в данном случае использования только лучевых скоростей очень плохо определяется скорость W_{\odot} , поэтому мы ее исключаем из числа определяемых параметров, принимая равной 7 км/с. Здесь были использованы РЗС с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15%. Были использованы все РЗС с ненулевым количеством вероятных членов скопления, по которым вычислялись средние значения лучевой скорости. Причем в случае ненулевых значений лучевой скорости в двух каталогах — MWSC и Субирана и др. (2018) — предпочтение отдавалось последнему.

Ошибка единицы веса σ_0 , которую мы находим при решении условных уравнений вида (1)–(3), характеризует усредненную по трем направлениям дисперсию остаточных скоростей РЗС. Известно,

что дисперсия остаточных скоростей водородных облаков в галактическом диске составляет около 5 км/с. Дисперсия остаточных скоростей ОВ-звезд лежит в интервале 8–10 км/с. Можно ожидать, что дисперсия скоростей относительно молодых РЗС $0 < \lg t \leq 8$ составит 8–10 км/с. Однако для этой выборки РЗС эта величина оказалась существенно больше ожидаемой, $\sigma_0 = 14.2$ км/с. Чтобы улучшить качество выборок РЗС с лучевыми скоростями, мы в дальнейшем поступаем так же, как Субиран и др. (2018). А именно, используем РЗС со средними значениями лучевых скоростей, вычисленными не менее чем по трем вероятным членам скопления.

В табл. 2 даны кинематические параметры, полученные в результате отдельных решений уравнения (1) и (2) для различных возрастных групп. Были использованы РЗС с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15%. При поиске решения только по лучевым скоростям были использованы РЗС со средними значениями, вычисленными не менее чем по трем вероятным членам скопления. Как видно из табл. 2, при таком подходе значения σ_0 , определенные по различным видам скоростей, сблизилась, хотя по лучевым скоростям они слегка превышают аналогичные величины, найденные по собственным движениям.

В качестве дополнительной характеристики пространственного распределения выборки в табл. 2 дано значение средней координаты z , которое обозначено как z_{\odot} и отражает известный факт возвышения Солнца над плоскостью Галактики. Обзор определений этой величины можно найти, например, в работе Бобылева, Байковой (2016), где по нескольким выборкам молодых объектов найдено $z_{\odot} = -16 \pm 2$ пк. Как следует из табл. 2, значения z_{\odot} , найденные по РЗС с возрастом $\lg t < 9.0$, находятся в хорошем согласии с известными результатами. Плохо согласуется

Таблица 2. Параметры вращения Галактики, найденные по РЗС различных возрастов с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15%

Параметры	Все возрасты	$0 < \lg t \leq 8$	$8 < \lg t \leq 9$	$9 < \lg t$
U_{\odot} , км/с	11.7 ± 1.0	9.0 ± 1.4	10.2 ± 1.3	15.1 ± 4.3
V_{\odot} , км/с	13.1 ± 1.0	13.9 ± 1.4	13.4 ± 1.5	13.6 ± 3.9
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.99 ± 0.14	-4.05 ± 0.23	-4.21 ± 0.19	-3.87 ± 0.46
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.37 ± 0.10	1.18 ± 0.37	0.67 ± 0.21	0.21 ± 0.23
σ_0 , км/с	13.5	9.4	13.5	20.3
N_{\star}	456	127	238	74
U_{\odot} , км/с	8.60 ± 0.54	7.68 ± 0.63	9.02 ± 0.81	11.7 ± 2.4
V_{\odot} , км/с	9.36 ± 0.70	8.15 ± 0.85	10.59 ± 1.03	10.1 ± 3.5
Ω_0 , км/с/кпк	28.78 ± 0.30	29.70 ± 0.36	28.64 ± 0.45	29.2 ± 1.2
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.988 ± 0.081	-4.061 ± 0.036	-4.107 ± 0.123	-3.67 ± 0.34
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.637 ± 0.039	0.677 ± 0.032	0.713 ± 0.063	0.40 ± 0.12
σ_0 , км/с	12.72	8.5	13.0	18.8
N_{\star}	1052	345	518	122
z_{\odot} , пк	-10 ± 5	-21 ± 4	-14 ± 5	32 ± 30
$(\Omega'_0)_{V_r}/(\Omega'_0)_{V_l}$	1.00 ± 0.04	1.00 ± 0.06	1.03 ± 0.05	1.05 ± 0.16

Примечание. В верхней части даны результаты, полученные только по лучевым скоростям V_r (уравнение (1)), а нижней части — только по компоненте V_l (уравнение (2)), N_{\star} — количество использованных скоплений.

с другими определениями только z_{\odot} , найденное по выборке самых старых РЗС. Кроме того, РЗС с логарифмом возраста более девяти имеют очень большое значение ошибки единицы веса, то есть большую дисперсию скоростей, поэтому в дальнейшем мы эти РЗС не используем. Анализ табл. 1 и 2 (главным образом значений σ_0) позволяет также заключить, что параметры вращения Галактики определяются точнее с использованием только их собственных движений, чем только по лучевым скоростям.

В последней строке табл. 2 дано отношение значений первой производной угловой скорости, найденной только с использованием лучевых скоростей $(\Omega'_0)_{V_r}$ к найденной только с использованием собственных движений $(\Omega'_0)_{V_l}$. Этот метод основан на том, что ошибки лучевых скоростей не зависят от ошибок расстояний, а ошибки тангенциальных компонент — зависят. Поэтому сравнение найденных различными способами значений Ω'_0 позволяет найти поправочный коэффициент шкалы расстояний p (Заболотских и др., 2002; Расторгуев и др., 2017; Бобылев, Байкова, 2017а), в

нашем случае $p = (\Omega'_0)_{V_r}/(\Omega'_0)_{V_l}$. Ошибка коэффициента p вычислена на основе соотношения $\sigma_p^2 = (\sigma_{\Omega'_{0V_r}}/\Omega'_{0V_l})^2 + (\Omega'_{0V_r} \cdot \sigma_{\Omega'_{0V_l}}/\Omega'^2_{0V_l})^2$. Таким методом в работе Бобылева, Байковой (2017а) из анализа более 50 000 звезд из каталога TGAS (Браун и др., 2016) была получена оценка $p = 0.97 \pm 0.04$. Согласно результатам, указанным в табл. 2, можем сделать однозначный вывод о том, что коэффициент шкалы расстояний равен единице, поэтому используемые расстояния не нуждаются в каком-либо поправочном множителе.

Далее были отобраны РЗС при ограничении на возраст $\lg t < 9.0$ и относительную ошибку параллакса $\sigma_{\pi}/\pi < 30\%$. Всего таких скоплений оказалось 930. Среди них 384 РЗС со средними значениями лучевых скоростей, которые были вычислены с использованием не менее трех вероятных членов скопления. По этой выборке РЗС из совместного решения всех уравнений вида (1)–(3) найдены следующие значения кинематических параметров:

$$(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (8.53, 11.22, 7.83) \pm (0.38, 0.46, 0.32) \text{ км/с}, \quad (5)$$

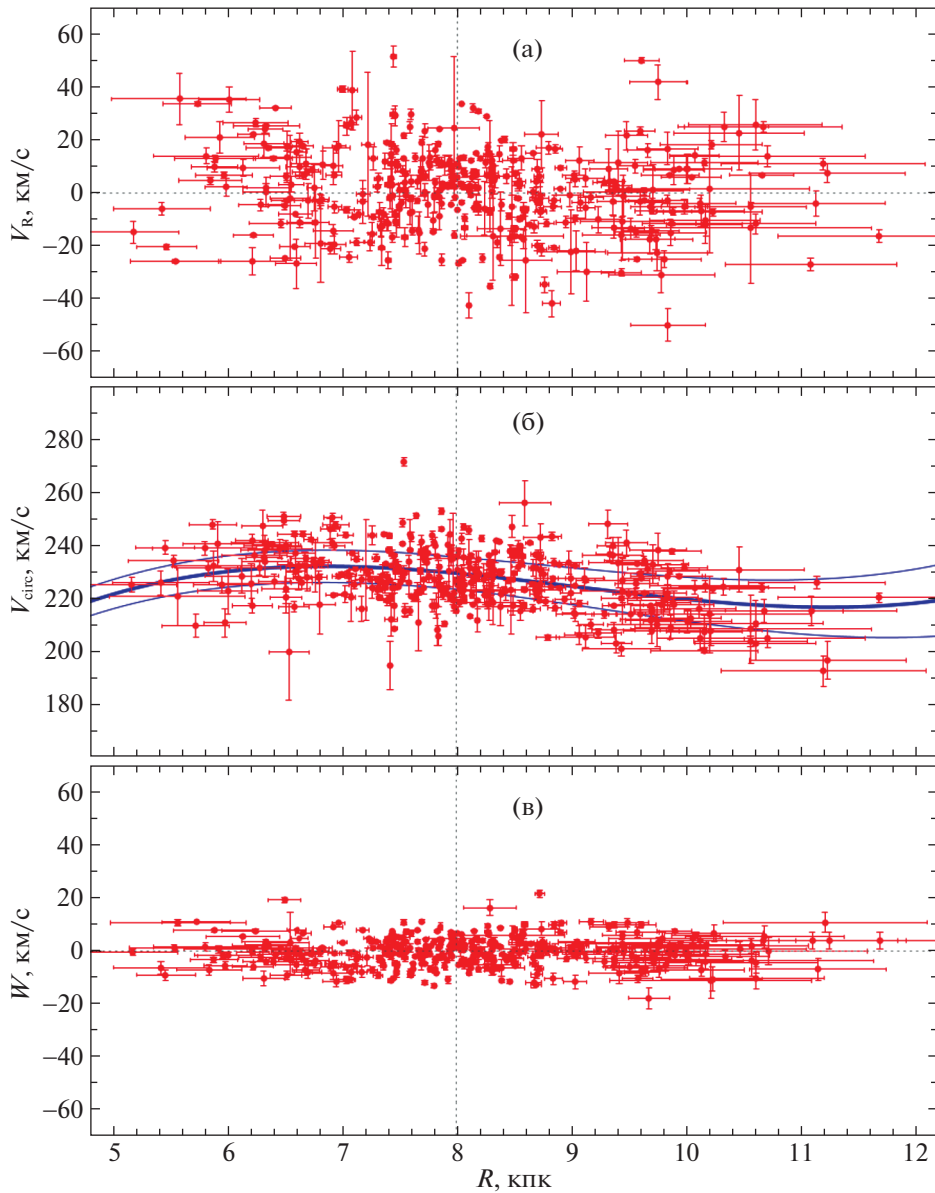


Рис. 1. Радиальные (а), тангенциальные (б) и вертикальные (в) скорости выборки из 384 РЗС, имеющих пространственные скорости, в зависимости от галактоцентрического расстояния, вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца.

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= 28.71 \pm 0.22 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -4.100 \pm 0.058 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.736 \pm 0.033 \text{ км/с/кпк}^3,\end{aligned}$$

где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 9.71$ км/с, линейная скорость вращения Галактики $V_0 = 229.7 \pm 4.6$ км/с на солнечном расстоянии, значения постоянных Оорта $A = 16.40 \pm 0.23$ км/с/кпк и $B = -12.31 \pm 0.32$ км/кпк.

На рис. 1 для 384 РЗС с пространственными скоростями (эти РЗС были использованы при

поиске решения (5)), даны их галактоцентрические радиальные, V_R , тангенциальные, V_{circ} , и вертикальные скорости, W , в зависимости от расстояния R . Видно, что наибольшая дисперсия скоростей наблюдается в радиальном (галактический центр—антицентр) направлении, а наименьшая — в вертикальном направлении. Значения дисперсий скоростей, вычисленные по данной выборке РЗС, составили: $(\sigma_{V_R}, \sigma_{\Delta V_{\text{circ}}}, \sigma_W) = (15.8, 11.3, 5.5)$ км/с.

Эта выборка содержит много относительно молодых РЗС, поэтому на всех трех графиках про-

смаиваются низкоамплитудные волны с длиной 2–3 кпк, вызванные влиянием галактической спиральной волны плотности. Такие периодичности в скоростях РЗС более детально были изучены в недавней работе Бобылева, Байковой (2019).

По этой же выборке из 930 РЗС, $\lg t < 9.0$, $\sigma_\pi/\pi < 30\%$ с использованием только двух уравнений вида (2)–(3) найдены следующие значения кинематических параметров:

$$\begin{aligned} (U_\odot, V_\odot, W_\odot) &= & (6) \\ &= (7.90, 9.61, 7.79) \pm (0.40, 0.53, 0.29) \text{ км/с,} \\ \Omega_0 &= 28.88 \pm 0.22 \text{ км/с/кпк,} \\ \Omega'_0 &= -4.078 \pm 0.061 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.684 \pm 0.033 \text{ км/с/кпк}^3, \\ \omega_1 &= 0.48 \pm 0.15 \text{ км/с/кпк,} \\ \omega_2 &= 0.32 \pm 0.20 \text{ км/с/кпк,} \end{aligned}$$

где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 8.5$ км/с. Интересно отметить, что ω_1 здесь значимо отличается от нуля.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вращение вокруг оси z

Расторгуевым и др. (2017) по данным о 130 мазерах с измеренными средствами РСДБ тригонометрическими параллаксами были найдены компонент скорости Солнца $(U_\odot, V_\odot) = (11.40, 17.23) \pm (1.33, 1.09)$ км/с, и следующие значения параметров кривой вращения Галактики: $\Omega_0 = 28.93 \pm 0.53$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.96 \pm 0.07$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.87 \pm 0.03$ км/с/кпк³, $V_0 = 243 \pm 10$ км/с (для найденного значения $R_0 = 8.40 \pm 0.12$ кпк).

Бобылевым, Байковой (2018б) по выборке из 495 OB-звезд с собственными движениями из каталога Gaia DR2 были найдены следующие значения кинематических параметров: $(U, V, W)_\odot = (8.16, 11.19, 8.55) \pm (0.48, 0.56, 0.48)$ км/с, $\Omega_0 = 28.92 \pm 0.39$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.087 \pm 0.083$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.703 \pm 0.067$ км/с/кпк³, где $V_0 = 231 \pm 5$ км/с (для принятого $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк).

По выборке из 326 молодых РЗС с собственными движениями из каталога Gaia DR2 и лучевыми скоростями из каталога MWSC Бобылевым, Байковой (2019) найдены следующие кинематические параметры: $(U, V, W)_\odot = (7.88, 11.17, 8.28) \pm (0.48, 0.63, 0.45)$ км/с, $\Omega_0 = 29.34 \pm 0.31$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.012 \pm$

0.074 км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.779 \pm 0.062$ км/с/кпк³, где $V_0 = 235 \pm 5$ км/с ($R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк).

Отметим, что кинематические параметры, соответствующие полученным нами решениям (5) и (6), находятся в наилучшем согласии с тремя указанными выше результатами. Более того, ошибки определяемых параметров являются наименьшими в решении (5). Таким образом, делаем вывод о том, что наилучшим решением для искомым кинематических параметров является решение (5), полученное по выборке из 930 РЗС, удовлетворяющей ограничениям на возраст $\lg t < 9.0$ и относительные ошибки тригонометрических параллакс $< 15\%$, включающей также лучевые скорости 384 РСЗ, вычисленные не менее чем по трем вероятным членам соответствующих скоплений.

Вращение вокруг осей x и y

Лай и др. (2017) выполнили кинематический анализ около 23 000 гигантов спектральных классов K–M из каталога TGAS (Браун и др., 2016) на основе модели Огородникова–Милна и нашли ненулевую компоненту $\omega_2 = -0.38 \pm 0.15$ мсд/год (вращение вокруг галактической оси y). Они интерпретировали это как возможное остаточное вращение в системе TGAS или наличие проблем в кинематической модели.

Проведенный в настоящей работе анализ кинематики РЗС не подтверждает такого большого вращения. Действительно, среднее расстояние выборки РЗС, использованных в получении решения (6), составило 2.0 кпк, тогда $\omega_1 = 0.051 \pm 0.016$ мсд/год и $\omega_2 = 0.034 \pm 0.021$ мсд/год. Видим, что здесь значение ω_2 на порядок отличается от результата Лая и др. (2017).

Как показано Линдгреном и др. (2018), система Gaia DR2 не имеет вращения относительно системы квазаров в пределах 0.15 мсд/год, причем наибольший эффект проявляется в области ярких ($G < 12^m$) звезд. Представляется, что средние собственные движения рассматриваемых РЗС были вычислены по значительному количеству именно ярких звезд. Таким образом, с одной стороны, найденное в настоящей работе значение $\omega_1 = 0.051 \pm 0.016$ мсд/год может быть следствием небольшого остаточного вращения системы Gaia DR2 относительно внегалактической системы координат.

С другой стороны, найденное в настоящей работе небольшое вращение вокруг галактической оси x с угловой скоростью 0.48 ± 0.15 км/с/кпк может быть каким-то образом связано с предполагаемой прецессией/вращением искривленного диска Галактики. Такое кинематическое явление на

протяжении многих лет различные авторы пытаются обнаружить в кинематике звезд и скоплений. Однако в настоящее время нет согласия между полученными результатами. На основе простейшей модели твердотельного вращения, например, Миямото и Чжу (1998) по собственным движениям звезд О–В5 нашли вращение этой системы звезд вокруг галактической оси x с угловой скоростью около 4 км/с/кпк. По собственным движениям примерно 80 000 звезд сгущения красных гигантов Бобылевым (2010) найдено вращение этой системы звезд вокруг оси x с угловой скоростью около –4 км/с/кпк. А по выборке классических цефеид было найдено вращение вокруг оси x со скоростью -15 ± 5 км/с/кпк (Бобылев, 2013).

Различные наблюдения в целом подтверждают асимметрию в вертикальных скоростях звезд (Лопес-Корредойра и др., 2014; Ромеро-Гомес и др., 2018), но для описания явления требуется применение сложной модели прецессии диска. На основе упрощенного подхода, Лопес-Корредойра и др. (2014) получили оценку вращения вокруг оси x с угловой скоростью ~ -2 км/с/кпк. Анализируя данные каталога Gaia DR2, Ромеро-Гомес и др. (2018) показали, что наблюдаемая структура вертикальных скоростей сложная, сильно зависит от возраста выборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по литературным данным нами составлена выборка из более 1000 рассеянных звездных скоплений с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2, а также их лучевыми скоростями из каталогов Gaia DR2 (преимущественно) и MWSC. Следуя последним результатам анализа нуля-пункта шкалы параллаксов каталога Gaia DR2, расстояния до РЗС вычислены с прибавлением поправки $\Delta\pi = 0.050$ мсд к оригинальным средним значениям их параллаксов.

Изучены совместный и раздельный способы решения основных кинематических уравнений при определении параметров вращения Галактики. Показано, что по РЗС, расположенным ближе 4–5 кпк от Солнца, параметры вращения Галактики определяются точнее с использованием только их собственных движений, чем только по лучевым скоростям. Сделан вывод о том, что коэффициент шкалы расстояний практически равен единице, $p = 1.00 \pm 0.04$, поэтому расстояния, вычисленные с использованием параллаксов из каталога Gaia DR2, не нуждаются в каком-либо поправочном множителе.

Тем не менее наилучшее (с наименьшей ошибкой единицы веса, а также с наименьшими ошибками определяемых параметров) решение получено

в результате совместного решения по выборке из 930 РЗС, отобранных при ограничении на возраст $\lg t < 9.0$, с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30%. В этом решении были использованы 384 РЗС со средними значениями лучевых скоростей, вычисленным не менее чем по трем вероятным членам скопления. Значения найденных параметров отражены в решении (5).

Из анализа собственных движений 930 РЗС установлено, что, помимо вращения вокруг галактической оси z (хорошо известное вращение Галактики), имеется значимо отличающееся от нуля вращение всей выборки вокруг галактической оси x с угловой скоростью $\omega_1 = 0.48 \pm 0.15$ км/с/кпк. Эту величину можно выразить и в угловых единицах с учетом среднего расстояния выборки РЗС, тогда $\omega_1 = 0.051 \pm 0.016$ мсд/год. Такое вращение может быть как кинематической особенностью РЗС, так и следствием небольшого остаточного вращения системы Gaia DR2 относительно внегалактической системы координат. Этот эффект, конечно, необходимо изучать и подтверждать на большем статистическом материале.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи. Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН П-28, подпрограмма “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арену и др. (Gaia Collaboration, F. Arenou, X. Luri, C. Babusiaux, C. Fabricius, A. Helmi, T. Muraveva, A.C. Robin, F. Spoto, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 17 (2018).
2. Бабиссо и др. (Gaia Collaboration, C. Babusiaux, F. van Leeuwen, M.A. Barstow, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bossini, A. Bressan, T. Cantat-Gaudin T., et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 10 (2018).
3. Беккари и др. (G. Beccari, H.M.J. Boffin, T. Jerabkova, N.J. Wright, V.M. Kalari, G. Carraro, G. De Marchi, and W.-J. de Wit), *MNRAS* **481**, L11 (2018).
4. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **36**, 667 (2010) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **36**, 634 (2010)].
5. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **39**, 909 (2013) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **39**, 819 (2013)].
6. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 3 (2016) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **42**, 1 (2016)].
7. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 210 (2018a) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **44**, 184 (2018)].
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 739 (2018b) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **44**, 675 (2018)].

9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, (2019) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **45**, (2019)].
10. 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**, 2 (2016).
11. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
12. Валле (J.P. Vallée), *Astrophysics and Space Science* **362**, 79 (2017).
13. де Грийс, Боно (R. de Grijs and G. Bono), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **232**, 22 (2017).
14. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, J. R.D. Lépine, R. Prates, C.D. Gneiding, and M. Sacchi), *MNRAS* **481**, 3887 (2018).
15. Заболотских М.В., Расторгуев А.С., Дамбис А.К., Письма в Астрон. журн. **28**, 516 (2002) [M.V. Zabolotskikh, et al., *Astron. Lett.* **28**, 454 (2002)].
16. Зари и др. (E. Zari, H. Hashemi, A.G.A. Brown, K. Jardine, and P.T. de Zeeuw), *Astron. Astrophys.* **620**, A172 (2018).
17. Зинн и др. (J.C. Zinn, M.H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello), arXiv: 1805.02650 (2018).
18. Камарильо и др. (T. Camarillo, M. Varun, M. Tyler, and R. Bharat), *PASP* **130**, 4101 (2018).
19. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, L. Balaguer-Núñez, C. Soubiran, et al.), *Astron. Astrophys.* **618**, A93 (2018).
20. Касамикела и др. (L. Casamiquela, R. Carrera, C. Jordi, L. Balaguer-Núñez, E. Pancino, S.L. Hidalgo, C.E. Martinez-Vázquez, S. Murabito, et al.), *MNRAS* **458**, 3150 (2016).
21. Конрад и др. (C. Conrad, R.-D. Scholz, N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, C. Boeche, G. Kordopatis, et al.), *Astron. Astrophys.* **562**, 54 (2014).
22. Крумхольц и др. (M.R. Krumholz, C.F. McKee, and J. Bland-Hawthorn), arXiv: 1812.01615 (2018).
23. Кун и др. (M.A. Kuhn, L.A. Hillenbrand, A. Sills, E.D. Feigelson, and K.V. Getman), *Astrophys. J.* **870**, id 32 (2018).
24. Кункель и др. (M. Kounkel, K. Covey, G. Suárez, C. Román-Zúñiga, J. Hernandez, K. Stassun, K.O. Jaehnig, E.D. Feigelson, et al.), *Astron. J.* **156**, 84 (2018).
25. Лай и др. (N. Liu, Z. Zhu, J.-C. Liu, and C.-Y. Ding), *Astron. Astrophys.* **599**, 140 (2017).
26. 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).
27. Лопес-Корредойра и др. (M. López-Corredoira, H. Abedi, F. Garzón, and F. Figueras), *Astron. Astrophys.* **572**, 101 (2014).
28. Мермийо и др. (J.C. Mermilliod, M. Mayor, and S. Udry), *Astron. Astrophys.* **485**, 303 (2008).
29. Миямото, Чжу (M. Miyamoto and Z. Zhu), *Astron. J.* **115**, 1483 (1998).
30. Пинсонью и др. (M.H. Pinsonneault, Y.P. Elsworth, J. Tayar, A. Serenelli, D. Stello, J. Zinn, S. Mathur, R. Garcia, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **239**, 32 (2018).
31. Расторгуев А.С., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Уткин Н.Д., Бобылев В.В., Байкова А.Т., *Астрофиз. Бюллетень* **72**, 134 (2017) [A.S. Rastorguev, et al., *Astrophys. Bull.* **72**, 122 (2017)].
32. 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).
33. Роккатаглиата и др. (V. Roccatagliata, G.G. Sacco, E. Franciosini, and S. Randich), *Astron. Astrophys.* **617**, L4 (2018).
34. Ромеро-Гомес и др. (M. Romero-Gómez, C. Mateu, L. Aguilar, F. Figueras, and A. Castro-Ginard), arXiv: 1812.07576 (2018).
35. Стассун, Торрес (K.G. Stassun and G. Torres), *Astrophys. J.* **862**, 61 (2018).
36. Субиран и др. (C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gomez, L. Casamiquela, C. Jordi, A. Vallenari, T. Antoja, L. Balaguer-Núñez, et al.), *Astron. Astrophys.* **619**, A155 (2018).
37. Франциосини и др. (E. Franciosini, G.G. Sacco, R.D. Jeffries, F. Damiani, V. Roccatagliata, D. Fedele, and S. Randich), *Astron. Astrophys.* **616**, 12 (2018).
38. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **558**, 53 (2013).
39. Ялялиева Л.Н., Чемель А.А., Глушкова Е.В., Дамбис А.К., Клиничев А.Д., *Астрофиз. Бюллетень*, **73**, 355 (2018) [L.N. Yalyalieva, et al., *Astrophys. Bull.* **73**, 335 (2018)].