

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАТАЛОГА Gaia EDR3

© 2021 г. А. С. Цветков^{1*}

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

Поступила в редакцию 22.08.2021 г.

После доработки 16.11.2021 г.; принята к публикации 04.12.2021 г.

Проведено решение звездно-кинематических уравнений Огородникова–Милна на материале всего звездного каталога Gaia EDR3, содержащего 1.8 млрд объектов. В силу недостаточной точности индивидуальных тригонометрических параллаксов произведено аналогичное решение на подкаталоге избранных 98 млн звезд, для которых параллакс известен с точностью лучше 10%. Проведен подробный анализ результатов этих решений в зависимости от звездной величины и расстояний до звезд.

Ключевые слова: Gaia, астрометрия, космическая астрометрия, звездная кинематика, структура Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010821120056

ВВЕДЕНИЕ

Космический аппарат Gaia продолжает свою работу на орбите, финальный каталог планируется к выпуску в первой половине 2022 г. (ESA, Gaia). Уже были выпущены предварительные каталоги Data Release: DR1 и DR2. 3 декабря 2020 г. вышел в свет Gaia Early Data Release 3 (Gaia EDR3) — “ранний релиз финального каталога” (Gaia, EDR3). Методика его построения и детали подробно изложены в (Gaia Collaboration, 2021). Этим данным посвящено такое количество работ, что даже кратко привести только их названия не представляется возможным.

Качество индивидуальных параллаксов в Gaia EDR3 еще весьма далеко от прогнозируемого (об этом ниже), поэтому мы провели серию стандартных исследований, которые уже применялись (Витязев и др., 2017) к массовым каталогам звезд, таким как NOMAD (Захариас и др., 2004), содержащим 1.1 млрд. объектов, или PRMXL (Рёзер и др., 2010) — 910 млн звезд. Эти исследования включают в себя получение различных статистических сведений, стандартный звездно-кинематический анализ и анализ с помощью сферических функций (Витязев, Цветков, 2014).

ОРГАНИЗАЦИЯ КАТАЛОГА

Исходные данные каталога EDR3 доступны на официальном сайте Gaia в виде 3386 сжатых фай-

лов, объемом около 200 Мбайт каждый. При распаковке объем файла возрастает примерно в два раза и составляет 400–450 Мбайт. Таким образом, полный объем скачиваемых данных составляет около 670 Гбайт, а распакованные данные требуют хранилища объемом уже около 1.5 Тбайт. Формат файлов — CSV — текстовый, поля записи каждой звезды разделены запятыми. Если какие-либо данные отсутствуют (а это часто бывает), две запятые идут подряд. Такой формат исходных данных легко поддерживается языком FORTRAN (Бартенев, 2000).

Каждая строка содержит информацию о 99 полях для одной звезды. Подробное описание каждого поля приведено в (Gaia, Chapter 13). Поля можно разделить по следующим категориям:

- идентификаторы;
- астрометрические параметры: координаты, собственные движения, параллакс и их ошибки;
- корреляции между параметрами;
- число и качество астрометрических наблюдений (самая большая группа);
- фотометрия в трех полосах;
- лучевые скорости (из DR2);
- галактические и эклиптические координаты.

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

ТОЧНОСТЬ ПАРАЛЛАКСОВ

Самый важный планируемый результат Gaia — высокоточные индивидуальные параллаксы звезд. В настоящее время заявленная точность (0.01 мсд) для большинства звезд еще не достигнута (Браун и др., 2021). Данные о параллаксе в EDR3 имеют 1 467 744 818 звезд, в то время как 343 964 953 звезд этих данных не имеют. Анализ параллаксов показал, что существует большая доля звезд, у которых ошибки составляют десятые доли мсд и выше. Точность лучше 0.2 мсд имеют только 500 млн звезд, т.е. примерно треть звезд, имеющих данные о параллаксах. Это приводит к тому, что лишь 520 млн имеют относительную погрешность параллакса лучше 50%, а лучше 10% — только 98 млн, 283 млн звезд имеют вообще отрицательный параллакс (что противоречит геометрическому смыслу параллакса). При этом, как показывает более детальный анализ, совершенно необязательно, чтобы у этих параллаксов были большие среднеквадратичные ошибки. Этот факт демонстрирует, что работа над параллаксами Gaia требует значительной работы и установления точного нуля-пункта параллаксов.

Таким образом, индивидуальные параллаксы следует использовать с большой осторожностью, хотя статистически для больших групп звезд усредненные параллаксы дают довольно надежные результаты.

ТОЧНОСТЬ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ

Данные о собственных движениях имеют все без исключения 1 811 709 771 звезд. Приведенные в каталоге точности в случайном отношении тоже еще не достигли проектируемых. Лишь 213 млн звезд имеют полную точность собственного движения лучше 0.1 мсд/год, а 406 млн — лучше 0.2 мсд/год. Однако относительная точность собственных движений значительно лучше, чем у параллаксов, в силу того, что сами собственные движения больше параллактических смещений. Полное собственное движение 77% звезд заключено в интервале от 2 до 8 мсд/год, а 93% — в интервале от 0 до 10 мсд/год. Таким образом, почти половина звезд каталога имеет относительную точность собственных движений лучше 10%. Такая высокая точность позволяет проводить любые звездно-кинематические исследования, базирующиеся на анализе собственных движений звезд.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Gaia использует свою собственную фотометрическую систему (Монтегриффо и др., 2020). “Синяя” компонента G_{BP} охватывает область от

ближнего ультрафиолета до красного цвета, “красная” G_{RP} — от красного до инфракрасного диапазона. От шкалы UBV эту систему отличают не только другие границы диапазонов полос, но и их ширина. Связь фотометрической шкалы Gaia с другими фотометрическими системами будет установлена позднее (Риелло и др., 2021).

Звездная величина G имеется практически у всех звезд (отсутствует только у 5 млн), в то время как фотометрия G_{BP} и G_{RP} присутствует у чуть более, чем 1.5 млрд звезд (отсутствует у 270 млн звезд).

В каталоге приведены измеренные потоки фотонов в трех полосах и их ошибки, а ошибок самих звездных величин нет, так как “звездные величины связаны нелинейным образом с измеренным потоком” (Gaia, Chapter 13).

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗВЕЗД ПОЛНОГО КАТАЛОГА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЙ

В каталоге Gaia приводятся только экваториальные собственные движения звезд $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ . Не составляет никакого труда перевести их в галактические $\mu_l \cos b$ и μ_b , которые будут использоваться в наших исследованиях.

В качестве основной модели мы используем широко известную модель Огородникова–Милна (Огородников, 1965), подробный вид уравнений этой модели изложен также в (дю Монт, 1977) и (Рыбка, 2004). В этой модели поле скоростей звезд представляется линейным выражением

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \mathbf{M}^+ \times \mathbf{r}, \quad (1)$$

где \mathbf{V} — скорость звезды, \mathbf{V}_0 — влияние поступательного движения Солнца, $\boldsymbol{\Omega}$ — угловая скорость твердотельного вращения звездной системы, \mathbf{M}^+ — симметричный тензор деформации поля скоростей.

Модель содержит всего 12 параметров, однако не все они могут быть независимо определены из собственных движений, и не все параметры входят в уравнения для лучевых скоростей:

$[U, V, W]$ — компоненты вектора \mathbf{V}_0 поступательного движения Солнца среди звезд;

$[\omega_1, \omega_2, \omega_3]$ — компоненты вектора угловой скорости $\boldsymbol{\Omega}$;

$[M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+]$ — параметры тензора деформации, описывающие сжатие-растяжение вдоль главных осей галактической системы координат;

$[M_{12}^+, M_{13}^+, M_{23}^+]$ — параметры тензора \mathbf{M}^+ , описывающие деформацию поля скоростей в основной и двух перпендикулярных плоскостях.

Таблица 1. Значения компонент скорости движения Солнца и угловой скорости твердотельного вращения в км/с/кпк, полученные из совместного решения для звезд различных величин G

| G | $U/\langle r \rangle$ | $V/\langle r \rangle$ | $W/\langle r \rangle$ | ω_1 | ω_2 | ω_3 |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 3 | 158.1 ± 44.5 | 294.2 ± 45.4 | 159.4 ± 42.5 | 45.6 ± 45.2 | 19.4 ± 45.7 | -26.4 ± 42.3 |
| 4 | 184.9 ± 31.3 | 209.2 ± 32.0 | 128.1 ± 29.3 | -59.5 ± 32.2 | 25.8 ± 32.6 | 3.6 ± 29.3 |
| 5 | 116.5 ± 10.6 | 181.0 ± 10.7 | 71.5 ± 9.9 | -13.1 ± 10.8 | 13.2 ± 10.9 | -21.1 ± 9.8 |
| 6 | 75.0 ± 4.9 | 132.3 ± 5.0 | 50.7 ± 4.5 | 6.1 ± 5.0 | 8.2 ± 5.1 | -15.6 ± 4.5 |
| 7 | 59.6 ± 1.9 | 111.2 ± 1.9 | 38.4 ± 1.8 | 1.9 ± 1.9 | -7.5 ± 2.0 | -12.2 ± 1.8 |
| 8 | 44.8 ± 1.0 | 91.3 ± 1.0 | 30.4 ± 1.0 | 0.6 ± 1.0 | -4.9 ± 1.0 | -11.4 ± 1.0 |
| 9 | 35.0 ± 0.6 | 77.7 ± 0.6 | 25.2 ± 0.6 | 1.5 ± 0.6 | -4.4 ± 0.6 | -10.7 ± 0.6 |
| 10 | 30.1 ± 0.3 | 67.1 ± 0.3 | 19.5 ± 0.3 | 0.6 ± 0.3 | -2.8 ± 0.3 | -11.6 ± 0.3 |
| 11 | 24.9 ± 0.2 | 58.8 ± 0.2 | 15.9 ± 0.2 | 0.8 ± 0.2 | -2.4 ± 0.2 | -11.8 ± 0.2 |
| 12 | 20.6 ± 0.1 | 51.6 ± 0.1 | 13.1 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 | -2.0 ± 0.1 | -11.9 ± 0.1 |
| 13 | 17.3 ± 0.1 | 46.3 ± 0.1 | 10.7 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -1.1 ± 0.1 | -12.4 ± 0.1 |
| 14 | 14.9 ± 0.1 | 42.5 ± 0.1 | 8.8 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | -0.9 ± 0.1 | -12.8 ± 0.1 |
| 15 | 12.7 ± 0.1 | 39.8 ± 0.1 | 7.3 ± 0.1 | 0.5 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -12.9 ± 0.1 |
| 16 | 10.9 ± 0.1 | 38.1 ± 0.1 | 6.3 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -12.6 ± 0.1 |
| 17 | 9.63 ± 0.05 | 36.95 ± 0.05 | 5.51 ± 0.05 | 0.62 ± 0.05 | -0.70 ± 0.05 | -12.29 ± 0.05 |
| 18 | 8.37 ± 0.04 | 35.48 ± 0.04 | 4.92 ± 0.04 | 0.38 ± 0.04 | -0.57 ± 0.04 | -12.08 ± 0.04 |
| 19 | 7.15 ± 0.04 | 33.19 ± 0.04 | 4.36 ± 0.04 | 0.25 ± 0.04 | -0.46 ± 0.04 | -11.93 ± 0.04 |
| 20 | 6.48 ± 0.03 | 31.69 ± 0.03 | 4.15 ± 0.03 | 0.33 ± 0.03 | -0.51 ± 0.03 | -11.80 ± 0.03 |

Таблица 2. Значения компонент тензора деформации в км/с/кпк, полученные из совместного решения для звезд различных величин G

| G | M_{12}^+ | M_{13}^+ | M_{23}^+ | M_{11}^* | X |
|-----|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 3 | -36.1 ± 55.2 | 18.3 ± 58.1 | -126.9 ± 57.1 | 192.9 ± 110.8 | 1.1 ± 103.8 |
| 4 | -1.8 ± 37.8 | 4.1 ± 41.5 | 28.3 ± 39.6 | -127.3 ± 78.5 | 37.2 ± 74.8 |
| 5 | 15.1 ± 13.0 | 9.3 ± 13.7 | 2.1 ± 13.5 | 6.9 ± 25.9 | -39.9 ± 25.1 |
| 6 | 25.2 ± 6.0 | 17.1 ± 6.4 | -5.0 ± 6.3 | 1.3 ± 11.9 | 8.9 ± 11.6 |
| 7 | 14.6 ± 2.3 | -3.3 ± 2.5 | -3.4 ± 2.4 | 2.8 ± 4.6 | -7.0 ± 4.4 |
| 8 | 15.2 ± 1.3 | -2.3 ± 1.3 | -2.9 ± 1.3 | -3.0 ± 2.5 | -2.1 ± 2.3 |
| 9 | 15.6 ± 0.8 | -1.9 ± 0.8 | -1.9 ± 0.8 | -1.2 ± 1.6 | 1.6 ± 1.4 |
| 10 | 17.1 ± 0.4 | -0.9 ± 0.4 | -1.1 ± 0.4 | -0.3 ± 0.9 | -0.7 ± 0.7 |
| 11 | 15.9 ± 0.2 | -0.5 ± 0.2 | -1.3 ± 0.2 | -1.3 ± 0.5 | 1.3 ± 0.4 |
| 12 | 15.2 ± 0.2 | -0.5 ± 0.2 | -0.4 ± 0.2 | -1.2 ± 0.3 | 0.6 ± 0.3 |
| 13 | 14.3 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -1.4 ± 0.2 | 1.4 ± 0.2 |
| 14 | 13.3 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -1.1 ± 0.2 | 1.0 ± 0.1 |
| 15 | 12.7 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | -0.9 ± 0.1 | 0.9 ± 0.1 |
| 16 | 12.1 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -0.5 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | 0.5 ± 0.1 |
| 17 | 11.4 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | 0.1 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 |
| 18 | 10.2 ± 0.1 | 0.1 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 |
| 19 | 9.12 ± 0.05 | 0.18 ± 0.05 | -0.02 ± 0.05 | 0.5 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 |
| 20 | 8.64 ± 0.04 | 0.12 ± 0.04 | -0.15 ± 0.04 | 0.4 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 |

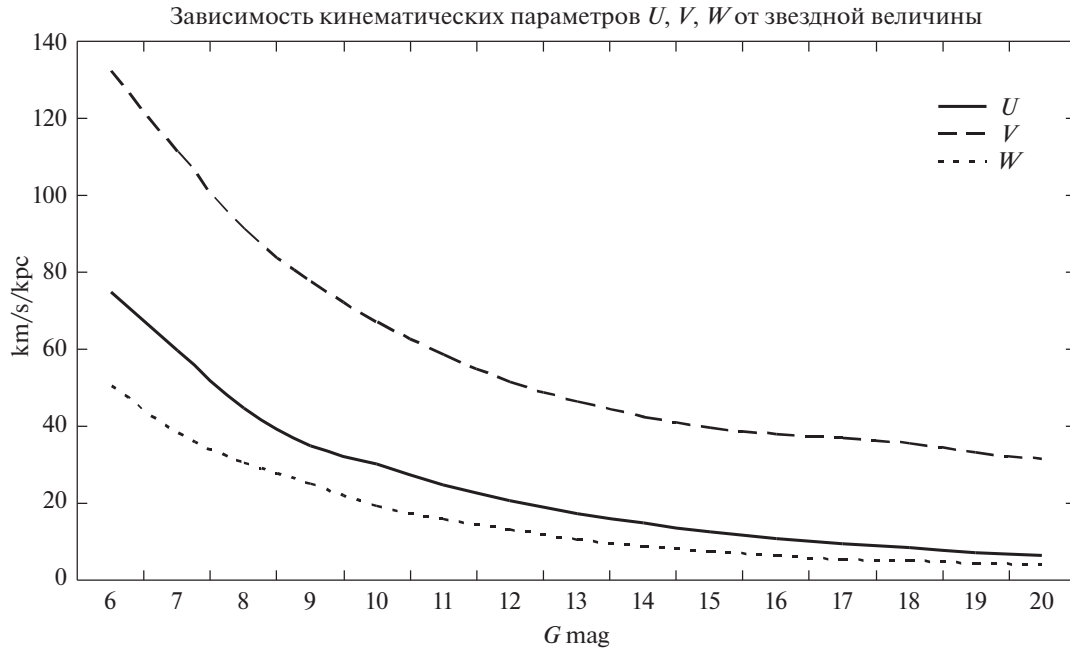


Рис. 1. Зависимость кинематических параметров движения Солнца $U/\langle r \rangle, V/\langle r \rangle, W/\langle r \rangle$ от звездной величины (км/с/кпк).

Спроецировав уравнение (1) на орты галактической системы координат, имеем для собственных движений:

$$\begin{aligned}
 k\mu_l \cos b &= U/r \sin l - V/r \cos l - \quad (2) \\
 &- \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \omega_3 \cos b + \\
 &+ M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + \\
 &+ M_{23}^+ \sin b \cos l - \frac{1}{2} M_{11}^+ \cos b \sin 2l + \\
 &+ \frac{1}{2} M_{22}^+ \cos b \sin 2l,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k\mu_b &= U/r \sin b \cos l + V/r \sin b \sin l - \quad (3) \\
 &- W/r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - \\
 &- \frac{1}{2} M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + \\
 &+ M_{23}^+ \cos 2b \sin l - \frac{1}{2} M_{11}^+ \sin 2b \cos^2 l - \\
 &- \frac{1}{2} M_{22}^+ \sin 2b \sin^2 l + \frac{1}{2} M_{33}^+ \sin 2b.
 \end{aligned}$$

В формулах (2) и (3) имеется линейная зависимость между коэффициентами $M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+$, поэтому авторы при анализе собственных движений обычно вводят замены $M_{11}^* = M_{11}^+ - M_{22}^+$ и $M_{33}^* = M_{33}^+ - M_{22}^+$ (дю Монт, 1977) либо (Витязев и др., 2018) вместо M_{33}^* вводят величину

$$X = M_{33}^+ - \frac{M_{11}^+ + M_{22}^+}{2}. \quad (4)$$

В этом случае уравнения (2) и (3) переписываются в виде

$$\begin{aligned}
 k\mu_l \cos b &= U/r \sin l - V/r \cos l - \quad (5) \\
 &- \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \omega_3 \cos b + \\
 &+ M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + \\
 &+ M_{23}^+ \sin b \cos l - \frac{1}{2} M_{11}^* \cos b \sin 2l,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k\mu_b &= U/r \sin b \cos l + V/r \sin b \sin l - \quad (6) \\
 &- W/r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - \\
 &- \frac{1}{2} M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + \\
 &+ M_{23}^+ \cos 2b \sin l - \frac{1}{4} M_{11}^* \sin 2b \cos^2 l + \frac{1}{2} X \sin 2b.
 \end{aligned}$$

Уравнения (5)–(6) часто используют для совместного решения по полным собственным движениям какого-либо каталога. При этом если не известно расстояние до звезд или известно недостаточно точно, то вместо величин U, V, W определяют $U/\langle r \rangle, V/\langle r \rangle, W/\langle r \rangle$, где $\langle r \rangle$ — среднее расстояние выборки звезд, для которой производят решение.

В табл. 1 и 2 приведено совместное решение для звезд Gaia EDR3, а графики на рис. 1–3 иллюстрируют данные таблиц.

Анализ этих результатов показывает, что солнечные члены $U/\langle r \rangle, V/\langle r \rangle, W/\langle r \rangle$, как и следовало ожидать, убывают с ростом звездной величины, так как имеется полная корреляция между



Рис. 2. Зависимость угловой скорости твердотельного вращения ω_1 , ω_2 , ω_3 от звездной величины (км/с/кпк).

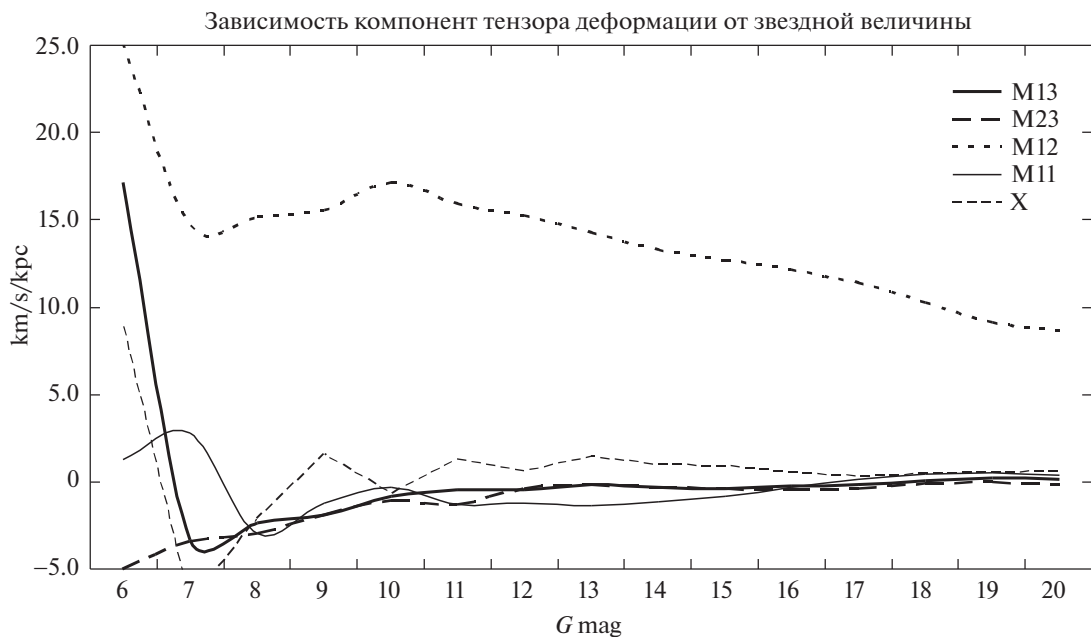


Рис. 3. Зависимость компонент тензора деформации M_{12}^+ , M_{13}^+ , M_{23}^+ , M_{11}^+ , X от звездной величины (км/с/кпк).

блеском звезды и расстоянием. Самая большая компонента — по оси Y — $V/\langle r \rangle$. Для ярких звезд 3, 4, 5, 6 величин эти параметры определяются ненадежно, это справедливо и для всех остальных параметров. Причина этого не только небольшое количество звезд в этом диапазоне (их, все-таки, не так мало для уравнений с 11-ю параметрами), но и пекулярная кинематика близких звезд. На это

обращали внимание исследователи еще с 1950-х годов (Шацова, 1950).

Рассматривая такой важный параметр, как угловая скорость твердотельного вращения системы ω_1 , ω_2 , ω_3 , мы видим также, что для самых ярких звезд параметры вектора угловой скорости вообще не определяются, а начиная со звезд 7-й величины, вектор определяется хорошо, но не перпендикулярен плоскости Галактики, это факт также известен (Цветков, Амосов, 2019). Интересны следующие

Таблица 3. Значения компонент скорости движения Солнца в км/с и угловой скорости твердотельного вращения в км/с/кпк, полученные из совместного решения для звезд различных расстояний

| r | U | V | W | ω_1 | ω_2 | ω_3 |
|-----------|----------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 0–100 | 10.2 ± 0.1 | 22.0 ± 0.1 | 7.2 ± 0.1 | -1.1 ± 1.4 | -12.1 ± 1.4 | -1.5 ± 1.4 |
| 100–200 | 9.7 ± 0.0 | 23.2 ± 0.0 | 7.3 ± 0.0 | 1.2 ± 0.2 | -6.3 ± 0.2 | -10.1 ± 0.2 |
| 200–300 | 9.9 ± 0.0 | 24.7 ± 0.0 | 7.7 ± 0.0 | 1.1 ± 0.1 | -2.5 ± 0.1 | -12.5 ± 0.1 |
| 300–400 | 10.3 ± 0.0 | 25.8 ± 0.0 | 7.8 ± 0.0 | 0.8 ± 0.1 | -1.3 ± 0.1 | -13.0 ± 0.1 |
| 500–600 | 10.8 ± 0.0 | 27.7 ± 0.0 | 7.8 ± 0.0 | 1.0 ± 0.0 | -1.1 ± 0.0 | -13.7 ± 0.0 |
| 700–800 | 11.5 ± 0.0 | 30.7 ± 0.0 | 7.8 ± 0.0 | -0.1 ± 0.0 | -0.4 ± 0.0 | -13.7 ± 0.0 |
| 900–1 К | 12.1 ± 0.0 | 34.6 ± 0.0 | 8.0 ± 0.0 | 0.1 ± 0.0 | 0.2 ± 0.0 | -13.7 ± 0.0 |
| 1.2–1.3 К | 2.9 ± 0.1 | 40.5 ± 0.1 | 8.0 ± 0.1 | 0.7 ± 0.0 | 0.5 ± 0.0 | -13.8 ± 0.0 |
| 1.5–1.6 К | 13.4 ± 0.1 | 46.5 ± 0.1 | 8.1 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | -14.0 ± 0.1 |
| 1.8–1.9 К | 13.4 ± 0.1 | 52.4 ± 0.1 | 8.0 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | -14.2 ± 0.1 |
| 2.1–2.2 | 13.5 ± 0.2 | 58.2 ± 0.2 | 8.0 ± 0.2 | 1.2 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -14.5 ± 0.1 |
| 2.4–2.5 | 13.9 ± 0.2 | 62.2 ± 0.2 | 7.8 ± 0.2 | 0.0 ± 0.1 | 0.0 ± 0.1 | -14.9 ± 0.1 |

Таблица 4. Значения компонент тензора деформации в км/с/кпк, полученные из совместного решения для звезд различных расстояний, а также число звезд, участвовавших в решении

| G | M_{12}^+ | M_{13}^+ | M_{23}^+ | M_{11}^* | X | N |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|-----------|
| 0–100 | 28.0 ± 1.8 | 4.2 ± 1.8 | -2.4 ± 1.8 | -1.7 ± 3.6 | 0.1 ± 3.6 | 372 226 |
| 100–200 | 19.4 ± 0.3 | -1.3 ± 0.3 | -1.2 ± 0.3 | -2.3 ± 0.5 | 0.1 ± 0.5 | 1 862 090 |
| 200–300 | 15.7 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -0.8 ± 0.1 | -5.1 ± 0.2 | 1.6 ± 0.2 | 3 515 477 |
| 300–400 | 14.7 ± 0.1 | -0.5 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -5.9 ± 0.2 | 2.2 ± 0.1 | 4 696 935 |
| 500–600 | 14.5 ± 0.1 | -1.1 ± 0.1 | -0.6 ± 0.1 | -6.5 ± 0.1 | 2.1 ± 0.1 | 5 245 459 |
| 700–800 | 14.1 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | 0.8 ± 0.1 | -5.3 ± 0.1 | 2.1 ± 0.1 | 5 272 993 |
| 900–1 К | 13.5 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | -4.1 ± 0.1 | 1.8 ± 0.1 | 5 235 217 |
| 1.2–1.3 К | 12.8 ± 0.1 | -0.1 ± 0.1 | -0.6 ± 0.1 | -3.4 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 | 4 741 504 |
| 1.5–1.6 К | 12.4 ± 0.1 | -0.2 ± 0.1 | -1.1 ± 0.1 | -3.0 ± 0.1 | 1.4 ± 0.1 | 3 871 940 |
| 1.8–1.9 К | 11.8 ± 0.1 | -0.3 ± 0.1 | -1.2 ± 0.1 | -2.8 ± 0.2 | 1.4 ± 0.1 | 2 839 861 |
| 2.1–2.2 | 11.1 ± 0.1 | -0.4 ± 0.1 | -1.2 ± 0.1 | -2.5 ± 0.2 | 1.2 ± 0.1 | 1 655 812 |
| 2.4–2.5 | 10.3 ± 0.1 | -0.7 ± 0.1 | -0.5 ± 0.1 | -2.4 ± 0.2 | 1.2 ± 0.2 | 1 041 495 |

обстоятельства. Во-первых, начиная со звезд 12-й величины, ошибки определяемых параметров становятся чрезвычайно малыми. Малость ошибок означает, что звезды идеально подчиняются принятой модели и не содержат никаких других кинематических компонент, но мы увидим, что это не совсем так. Во-вторых, компоненты вектора вращения ω_1 , ω_2 значимо отличаются от нуля даже для слабых (и, по-видимому, далеких) звезд, что указывает на то, что вектор вращения не совсем перпендикулярен плоскости Галактики.

Анализ компонент тензора деформации показывает, что практически все компоненты, за исключением параметра M_{12}^+ (а это параметр Оорта A), быстро убывают к нулевым значениям. Небольшое

исключение составляет параметр M_{11}^* , ответственный за разность растяжений звездной системы по осям X и Y . Он довольно долго сохраняет ненулевое значение, и заметно уменьшается лишь для звезд 16–17-й величины и слабее.

КИНЕМАТИКА ЗВЕЗД С ТОЧНОСТЬЮ ПАРАЛЛАКСОВ ЛУЧШЕ 10%

Анализ распределений звезд по параллаксам и их точностям показывает, что для звездно-кинематических исследований, которые нуждаются в расстояниях, следует использовать звезды с высокой относительной точностью параллаксов. Для этого мы создали подкаталог, состоящий из

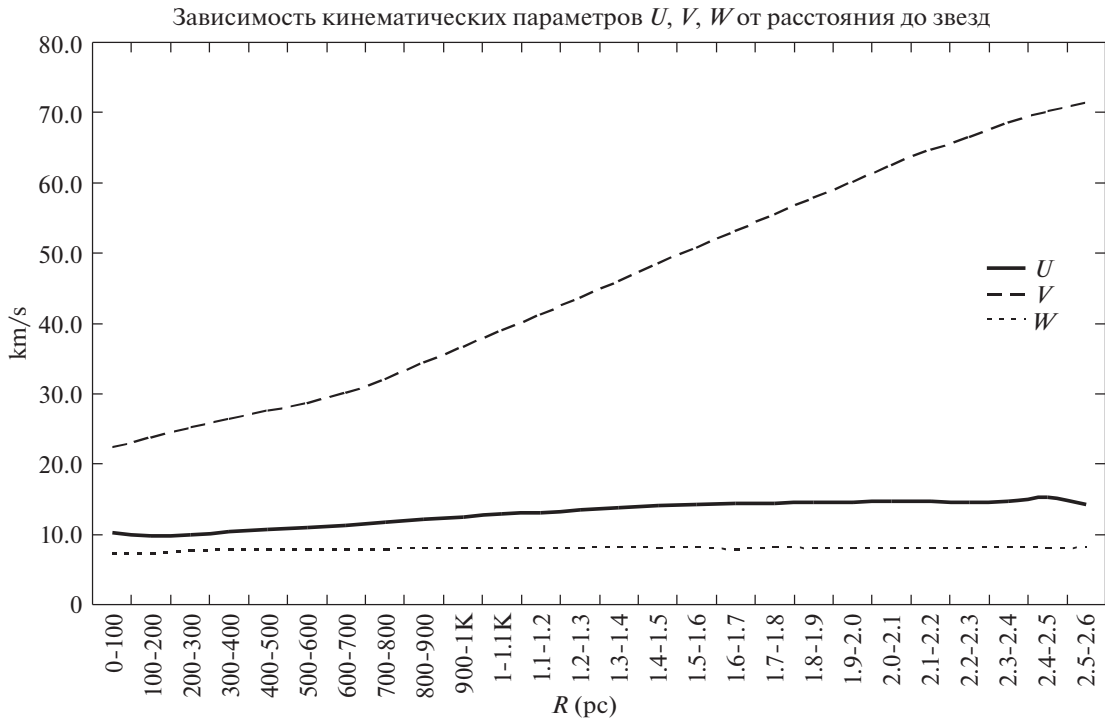


Рис. 4. Зависимость кинематических параметров движения Солнца U , V , W от расстояния до звезд (км/с).

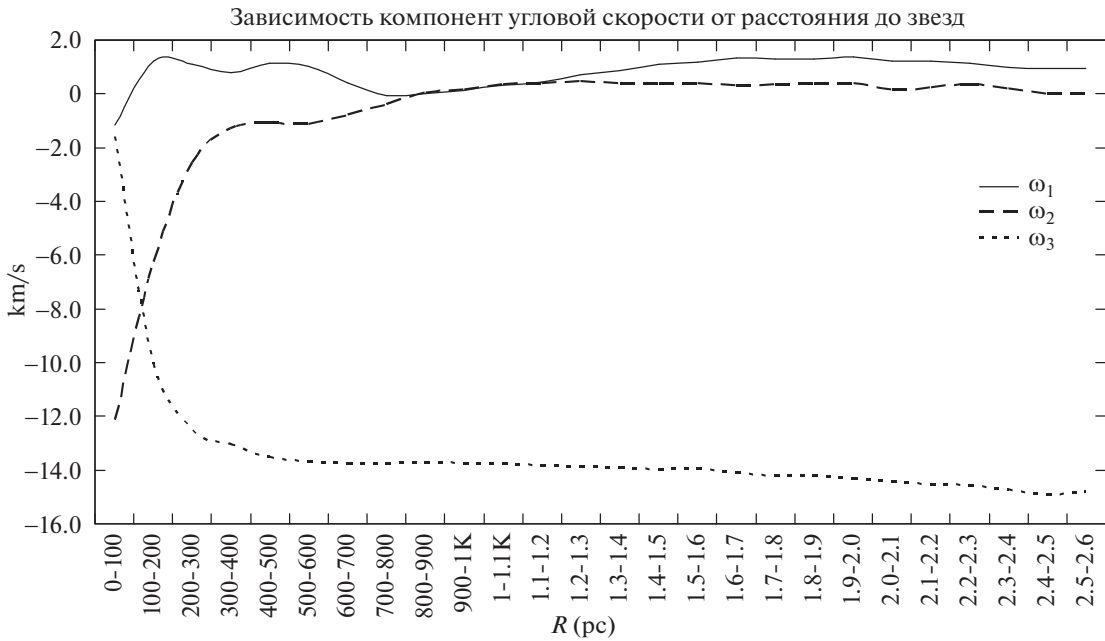


Рис. 5. Зависимость угловой скорости твердотельного вращения ω_1 , ω_2 , ω_3 от расстояния до звезд (км/с/кпк).

98 506 335 звезд, которые удовлетворяют этому критерию. Так как пока даже формальная 10%-я точность параллакса не гарантирует надежного значения параллакса каждой звезды, мы поступили стандартным образом, разбив звездный материал на сферические слои, удаленные от Солнца на разные расстояния. Для этих групп звезд были решены уравнения в рамках модели Огородникова—

Милна и разложение собственных движений по системе векторных сферических функций. Результаты приведены в табл. 3 и 4. Для компактности, начиная 400 пк, приведены не подряд, так как значения изменяются довольно медленно. В табл. 4 дополнительно указано число звезд, использовавшихся в решении. Само решение базировалась на усредненных данных собственных движений и

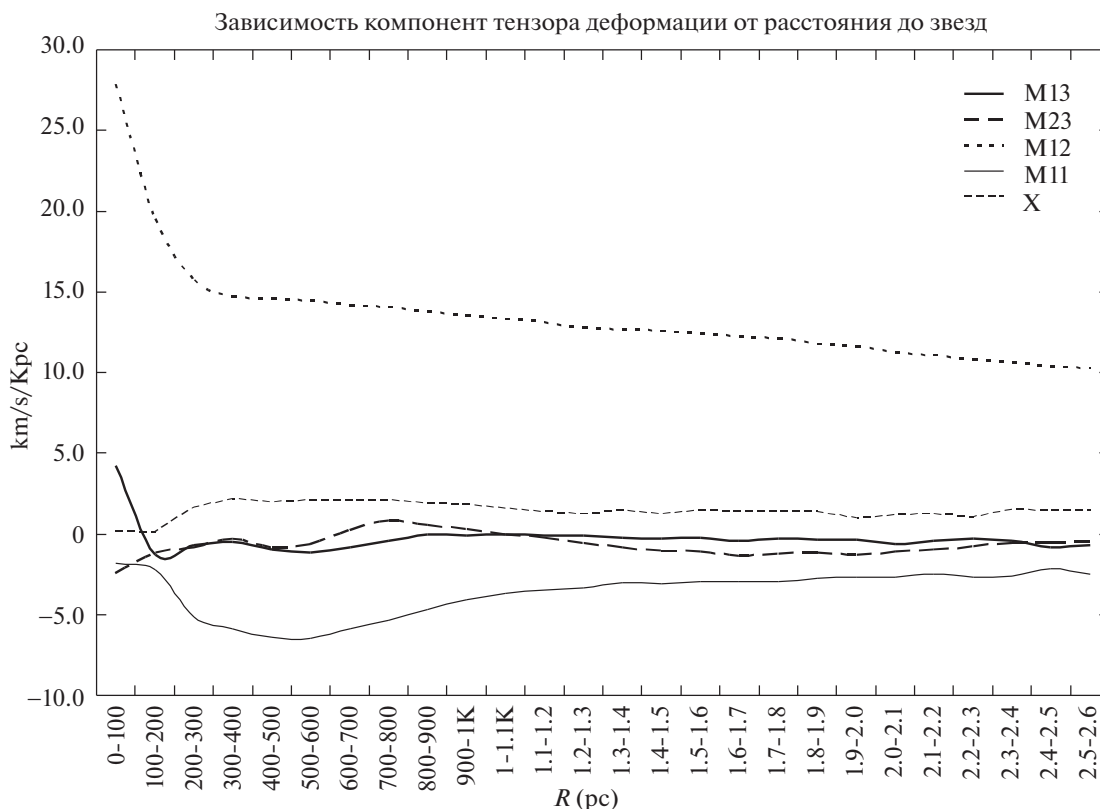


Рис. 6. Зависимость компонент тензора деформации M_{12}^+ , M_{13}^+ , M_{23}^+ , M_{11}^+ , X от расстояния до звезд (км/с/кпк).

расстояний по 49 152 площадкам HealPix ($N = 64$) с равными весами площадок. Рисунки 4–6 иллюстрируют содержание табл. 3 и 4.

Анализ результатов показывает, что в пределах 1.5–2 Кпк трехмерная модель в состоянии удовлетворительно описывать кинематику звезд, хотя сами параметры претерпевают порой значительные изменения в зависимости от рассматриваемой группы звезд (особенно солнечный параметр V). По-прежнему самые близкие звезды составляют проблемную область, в которой кинематика не подчиняется трехмерной модели. Однако с расстояния примерно 300 пк кинематические параметры принимают свои обычные значения. Звезды ближе 100 пк имеют большие пекулярные скорости, которые с расстоянием просто перестают быть заметными, поскольку нарастают глобальные эффекты вращения Галактики.

Вообще говоря, считается, что упрощенная линейная модель Оорта–Линдблада или полная Огородникова–Милна может использоваться до расстояний 1–1.5 кпк (Огородников, 1965). Но мы видим, что параметры Оорта $A = M_{12}^+$ и $B = \omega_3$ хотя и меняются с расстоянием, но очень плавно, сохраняя свой общий характер. Прочие параметры (компоненты угловой скорости ω_1 , ω_2 и тензора деформации M_{11}^* , M_{13}^+ , M_{23}^+ , X) с увеличением расстояния стремятся к близким к

нулю значениям. Разве что только M_{11}^* показывает ненулевые значения (разность сжатия системы по оси X и Y).

Сильнее всего бросается в глаза ход параметра V — скорости движения Солнца вдоль оси Y , т.е. вдоль оси, направленной по вращению Галактики. Объяснение, очевидно, может быть таким: скорость движения Солнца оценивается относительно групп звезд на разных расстояниях, а эти группы сами движутся относительно друг друга. В плоскости Галактики по направлению, перпендикулярному на центр Галактики, эти различия сильны и имеют большой систематический ход. Аналогичные результаты были получены нами ранее по каталогу Gaia DR2 with RV (Цветков, Амосов, 2019), но поведение параметра V было несколько иным. Его значение оставалось стабильным (около 22 км/с) до расстояний 800 пк, далее начинался линейный рост. В нашем случае мы наблюдаем линейный рост сразу же.

Еще одна особенность параметров движения Солнца — это их надежные и предсказуемые значения даже для самых близких звезд, чего не скажешь о параметрах вращения и деформации, которые выходят на стабильные значения только с расстояний 400–500 пк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными других исследователей на материале каталогов Gaia предыдущих версий (Й. Бови, 2017; Величко и др., 2020). Показана относительная постоянность на расстояниях более 500 пк параметров движения Солнца U и W , всех трех компонент угловой скорости, компонент тензора деформации M_{13}^+ , M_{23}^+ , M_{11}^* , X . Отчетливо наблюдается систематический ход с расстоянием компоненты V и параметра Оорта $A = M_{12}^+$. Изменение этих параметров является следствием нелинейности хода угловой скорости вращения Галактики в направлении центр-антицентр. Построению такой модели и детальному ее анализу будет посвящена следующая статья. Кроме этого остается под вопросом полнота модели Огородникова–Милна. Проведенные нами ранее исследования на материале предыдущего релиза Gaia DR2 (Цветков и др., 2020) показывают наличие систематических компонент в собственных движениях, не описываемых этой моделью. Этот вопрос также будет обсужден в следующей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ESA Gaia: <https://sci.esa.int/web/gaia>
2. Gaia, EDR3: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>
3. Gaia, Chapter 13: https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GEDR3/Gaia_archive/chap_data-model/
4. Gaia Collaboration, *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021).
5. Баргеньев О.В., Современный Фортран. 3-е изд., доп. и перераб. М.: ДИАЛОГМИФИ, 449 с. (2000).
6. Бови (Jo Bovy), *MNRAS: Lett.* **468**, Iss. 1, L63 (2017).
7. Браун и др. (A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **649** (2021).
8. Величко и др. (A. Velichko, P. Fedorov, and V. Akhmetov), *MNRAS* **494**, 1430 (2020).
9. Витязев, Цветков (V.V. Vityazev and A.S. Tsvetkov), *MNRAS* **442**, 1249 (2014).
10. Витязев В.В. и др., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 265 (2018) [V.V. Vityazev, et al., *Astron. Lett.* **44**, 236 (2018)].
11. Витязев и др. (V.V. Vityazev, A.S. Tsvetkov, V.V. Bobylev, and A.T. Bajkova), *Astrophysics* **60**, 503 (2017).
12. Горски и др. (K.M. Gorski, E. Hivon, A.J. Banday, et al.), *Astrophys. J.* **622** (2005).
13. Джонсон, Морган (H.L. Johnson and W.W. Morgan), *Astrophys. J.* **117**, 313 (1953).
14. Дю Монт (B.A. du Mont), *Astron. Astrophys.* **61**, 127 (1977).
15. Захариас и др. (N. Zacharias, D.G. Monet, S.E. Levine, et al.), *Bull. Am. Astron. Soc.* **36**, 1418 (2004).
16. Касагранд, Ванденберг (L. Casagrande and D. Vandenberg), *MNRAS: Lett.* **479**, L102 (2018).
17. Кац и др. (D. Katz, et al.), *Astron. Astrophys.* **622**, A205 (2019).
18. Михалик и др. (D. Michalik, L. Lindegren, and D. Hobbs), *Astron. Astrophys.* **574**, id.A115, 8 p. (2015).
19. Монтегриффо и др. (P. Montegriffo, F. De Angeli, M. Bellazzini, et al.), Gaia EDR3 passbands, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/edr3-passbands> (2020).
20. Огородников К.Ф., *Динамика звездных систем* (М.: Физматгиз, 1965).
21. Рыбка С.П., *Кинемат. и физ. небесн. тел* **20**, 437 (2004).
22. Рёзер и др. (S. Roeser, M. Demleitner, and E. Schilbach), *Astron. J.* **139**, 2440 (2010).
23. Риелло и др. (M. Riello, F. De Angeli, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A3 (2021).
24. Цветков А.С., *Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos* (СПб, 2005).
25. Цветков А.С., Амосов Ф.А., *Письма в Астрон. журн.* **45**, 517 (2019) [A.S. Tsvetkov, F.A. Amosov, *Astron. Lett.* **45**, 462 (2019)].
26. Цветков А.С., Амосов Ф.А., Трофимов Д.А., Петров С.Д., *Письма в Астрон. журн.* **46**, 61 (2020) [A.S. Tsvetkov, et al., *Astron. Lett.* **46**, 58 (2020)].
27. Шацова, Р.Б., *Ученые записки ЛГУ*, № 136 (1950).