

ОСНОВНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКО-КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАТАЛОГА GAIA EDR3

© 2022 г. А. С. Цветков

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.s.tsvetkov@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.08.2021 г.

После доработки 02.09.2021 г.

Принята к публикации 23.09.2021 г.

В недавнем выпуске журнала “Вестник РАН” (№ 2, 2021) в статье “Достижения космической астрометрии” речь шла о развитии астрометрии от древнейших времён до космического проекта Gaia. В представленной работе, продолжающей эту тему, детально разбираются свойства последнего релиза звёздного каталога Gaia EDR3, содержащего 1.8 млрд объектов. Обсуждаются способы обработки его данных на персональных компьютерах, доступных большинству пользователей. Проведено подробное статистическое исследование каталога, получены распределения звёзд по небесной сфере, что даёт возможность оценить объём и качество материала. Сделан анализ трёхполосной фотометрии каталога, построены распределения показателей цвета, диаграммы Герцшпрунга–Рессела.

Ключевые слова: астрометрия, Gaia, космическая астрометрия, звёздная кинематика.

DOI: 10.31857/S0869587322010108

Космический аппарат Gaia ещё работает на орбите, финальный каталог планируется к выпуску в первой половине 2022 г. [1]. Уже изданы предварительные каталоги — так называемые Data Release DR1 и DR2. 3 декабря 2020 г. вышел в свет Gaia Early Data Release 3 [2] — “ранний релиз финального каталога” [2]. Методика его построения и детали подробно изложены в работе [3]. Этим данным посвящено такое количество публикаций, что даже краткое перечисление их названий не представляется возможным. Консорциум Gaia имеет доступ к огромным вычислительным ресурсам, системам распределённых вычислений, специальным лабораториям с инже-

рами и программистами. Возникает вопрос: можно ли с помощью более скромных ресурсов проводить научные исследования не только небольших подмножеств каталога, таких как TGAS [4] или Gaia DR2 with Radial Velocities [5], но и всего объёма данных? Практика показала, что при чётко поставленных задачах, известной оптимизации вычислительных процессов, быстрых носителях данных, современных персональных компьютерах с достаточной оперативной памятью такая работа вполне возможна и служит хорошей подготовкой к обработке финальной версии каталога (видимо, первой, так как очевидно, что будут дальнейшие её улучшения).

Качество индивидуальных параллаксов в Gaia EDR3 весьма далеко от прогнозируемого, поэтому мы провели серию стандартных исследований, уже применявшихся к массовым каталогам, например, к NOMAD [6], где содержится 1.1 млрд объектов, или PRMXL [7] — 910 млн звёзд.

ОРГАНИЗАЦИЯ КАТАЛОГА

Исходные данные каталога EDR3 доступны на официальном сайте Gaia в виде 3386 сжатых файлов объёмом около 200 Мбайт каждый. При упаковке объём файла возрастает примерно в 2 ра-



ЦВЕТКОВ Александр Станиславович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии СПбГУ.

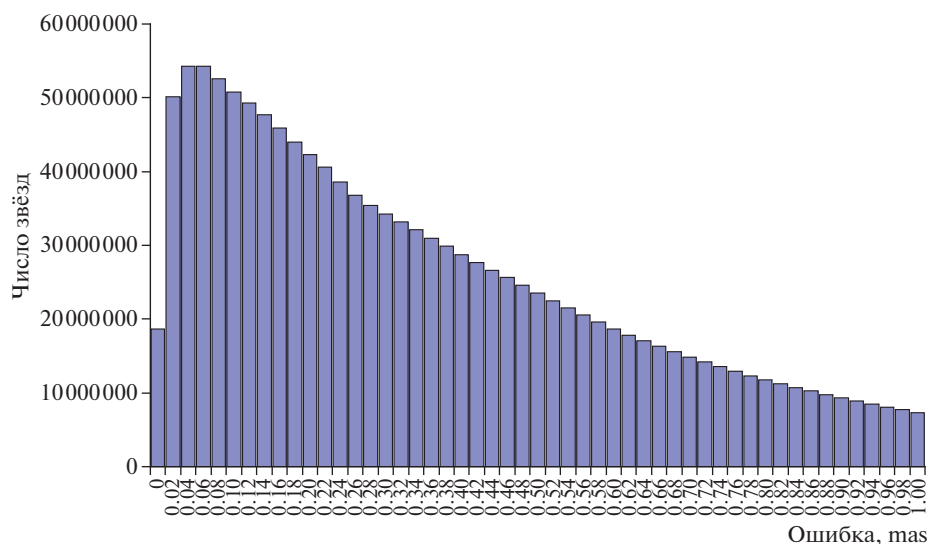


Рис. 1. Распределение звёзд Gaia EDR3 по ошибке параллакса

за – до 400–450 Мбайт. Таким образом, полный объём скачиваемых данных составляет около 670 Гбайт, а распакованный требует хранилища объёмом около 1.5 Тбайт. Формат файлов – CSV – текстовый, поля записи каждой звезды разделены запятыми. Если какие-либо данные отсутствуют (а так бывает часто), две запятые идут подряд. Такой формат исходных данных легко поддерживается языком FORTRAN [8].

Каждая строка содержит информацию о 99 полях для одной звезды. Подробное описание каждого поля приведено в работе [9]. Поля можно разделить по следующим категориям:

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

Следует сказать, что полное чтение каталога в текстовом виде занимает много часов. Для звёздно-кинематических исследований далеко не все поля необходимы, поэтому первая процедура при обработке таких данных – выделение нужной информации и запись данных в бинарном виде так, чтобы при последующем чтении не преобразовывать их. Процедуру переформатирования, которая действительно потребует чтения всех текстовых данных, достаточно провести однократно. Для наших целей мы выбрали 22 основных поля, при этом полный объём несжатых бинарных данных сократился до 250 Гбайт, а с учётом возмож-

ностей современных файловых систем динамически сжимать данные (это увеличивает скорость чтения – нужно читать меньше блоков) объём составил всего 180 Гбайт. Размещение таких сравнительно небольших данных на быстром винчестере, а лучше на SSD, приводит к значительному увеличению скорости решения задач, требующих чтения всего каталога.

ОБЩИЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Перед проведением любых исследований необходимо понять точность, объём и основные особенности наблюдательного материала. Хотя на сайте Gaia приведено много информации такого рода, всегда следует повторять эти исследования самостоятельно, чтобы убедиться в правильности всего вычислительного процесса.

Параллаксы. Самый важный планируемый результат Gaia – высокоточные индивидуальные параллаксы звёзд. Сейчас заявленная точность (0.01 мсд – миллисекунды дуги) для большинства звёзд ещё не достигнута [10]. Данные о параллаксе в каталоге имеют 1467744818 звёзд, в то время как для 343964953 звёзд их нет. На рисунке 1 показано распределение звёзд по абсолютной ошибке параллакса, выраженной в мсд. Анализ этой диаграммы свидетельствует, что существует большая доля звёзд, у которых ошибки составляют десятки доли мсд и выше. Точность лучше 0.2 мсд имеют только 500 млн звёзд, то есть примерно треть из имеющих данные о параллаксах. Это приводит к распределению звёзд по относительной ошибке параллакса σ_{π}/π , как представлено на рисунке 2. Примерно такая же часть (520 млн)

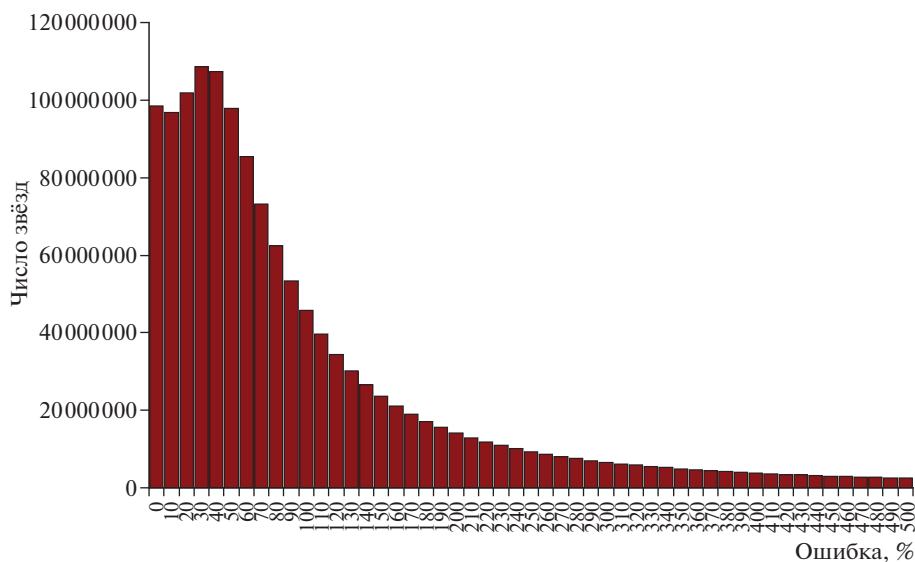


Рис. 2. Распределение звёзд Gaia EDR3 по относительной ошибке параллакса

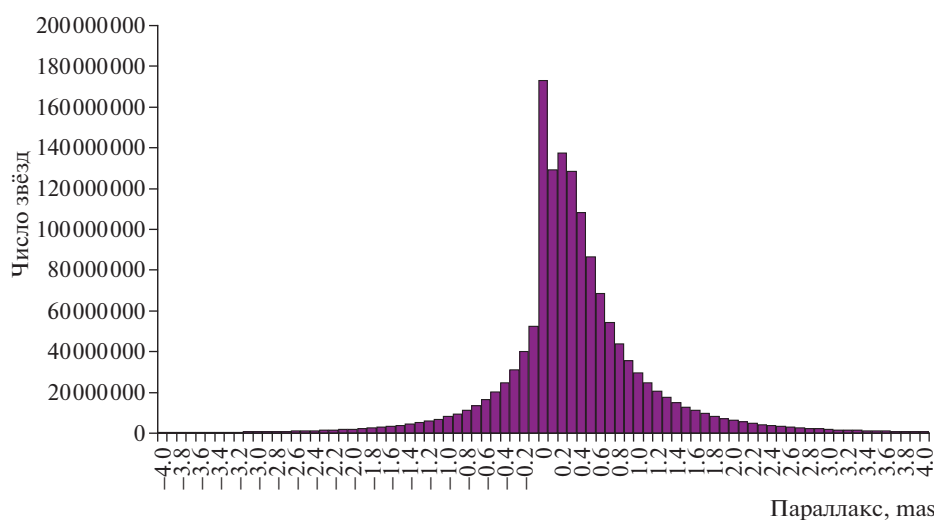


Рис. 3. Распределение звёзд Gaia EDR3 по параллаксам

звёзд имеет относительную погрешность параллакса лучше 50%, а меньше — 10% — только 98 млн.

Самый интересный результат — распределение звёзд по параллаксам (рис. 3). Видно, что 283 млн звёзд имеют отрицательный параллакс, что противоречит геометрическому смыслу самого понятия. При этом, как показывает детальный анализ, совершенно необязательно, чтобы у таких параллаксов были большие среднеквадратичные ошибки. Данный факт говорит о том, что работа над параллаксами Gaia ещё требует значительных усилий и установления точного нуля-пункта параллаксов.

Таким образом, индивидуальные параллаксы следует использовать с осторожностью, хотя статистически для больших групп звёзд усреднённые параллаксы дают довольно надёжные результаты, что будет продемонстрировано на примере построения диаграммы Герцшпрунга—Рессела.

Собственные движения. Данные о собственных движениях $\mu_{\alpha} \cos \delta$ и μ_{δ} имеют все без исключения 1811 709 771 звезда. Приведённые в каталоге точности в случайном отношении тоже пока не достигли проектируемых. Лишь 213 млн звёзд 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,

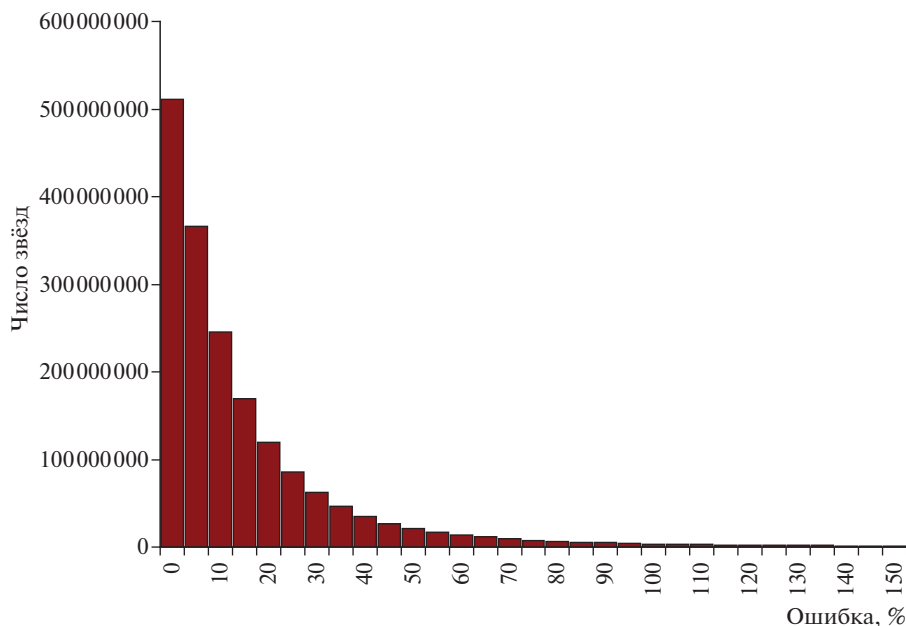


Рис. 4. Распределение звёзд Gaia EDR3 по относительной ошибке полного собственного движения

в силу того что сами собственные движения больше параллактических смещений (рис. 4). Полное собственное движение 77% звёзд заключено в интервале от 2 до 8 мсд/год, а 93% — в интервале от 0 до 10 мсд/год. Таким образом, почти половина звёзд каталога имеет относительную точность собственных движений лучше 10%. Такая высокая точность позволяет проводить любые звёздно-кинематические исследования, базирующиеся на анализе собственных движений звёзд.

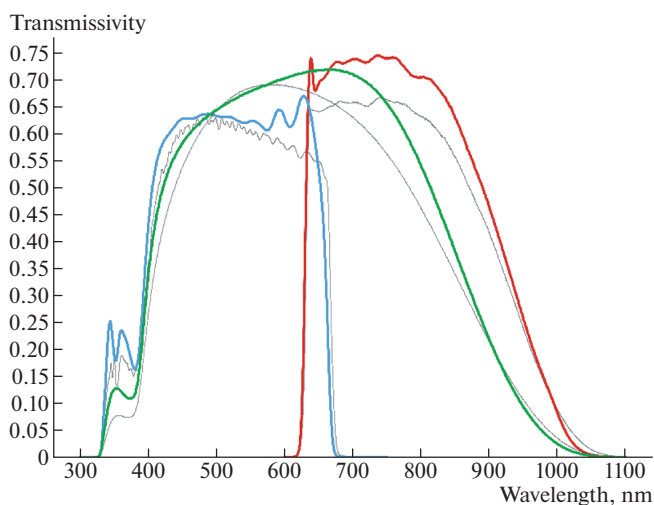


Рис. 5. Полосы пропускания Gaia EDR3: цветные линии на рисунке показывают полосы пропускания G (зелёный), Bp (синий) и Rp (красный), определяющие фотометрическую систему Gaia EDR3

Фотометрия. Gaia использует собственную фотометрическую систему [11]. Полосы пропускания показаны на рисунке 5¹. Они совсем не похожи ни на шкалу UBV Джонсона [12], ни на систему Hipparcos/Tycho [13]. 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. Пики шкалы Джонсона значительно уже и не накладываются друг на друга. Связь фотометрической шкалы Gaia с другими подобными системами будет установлена позже [14].

Звёздная величина G имеется практически у всех звёзд (только у 5 млн она отсутствует), в то время как фотометрической величиной Bp (blue photometer) и Rp (red photometer) обладают чуть более чем 1.5 млрд звёзд (у 270 млн её нет).

В каталоге приведены измеренные потоки фотонов в трёх полосах и их ошибки, а ошибок самих звёздных величин нет, так как “звёздные величины связаны нелинейным образом с измеренным потоком” [9].

На рисунке 6 представлено распределение звёзд Gaia по звёздной величине G . Максимум распределения приходится на 20 величину.

¹ Журнал “Вестник РАН” с цветными изображениями размещается в открытом доступе на сайте ИКЦ “Академнига” <https://sciencejournals.ru/journal/vestnik/>. Для доступа к полным текстам журнала не требуется регистрации.

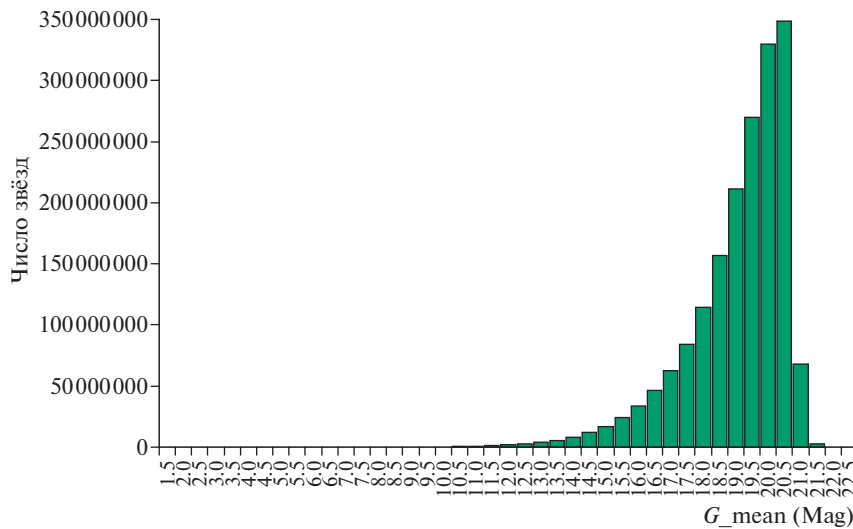


Рис. 6. Распределение звёзд Gaia EDR3 по звёздной величине G

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЁЗД ПО НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ

Звёздная плотность в зависимости от величины G .

Распределение звёзд каталога по небесной сфере показывает, что даже для ярких звёзд ($G = 8$) отчётливо наблюдается концентрация к галактическому экватору. Это говорит о том, что среди них уже есть далёкие объекты. Для более слабых звёзд ($G = 20$) концентрация просматривается к галактической плоскости и балджу – основной наблюдаемый эффект (рис. 7). Для представления звёздной плотности небесная сфера была разделена методом HealPix [15] с ключевым числом $N = 64$, что давало 49 152 площадки. Таким образом, одна площадка занимала немногим меньше 1 кв. градуса – точнее, 0.83. Приведённые иллюстрации могут составить неверное ощущение, что

звёзд в околополярных областях практически нет, но это не так. Даже вдали от галактического экватора их плотность составляет сотни звёзд на кв. градус. Ясно, что слабые звёзды, располагающиеся вдали от галактического экватора, – в основном близкие карлики.

Звёздная плотность в зависимости от расстояния до звёзд. Любопытно выглядит зависимость распределения звёзд по небесной сфере от расстояния. Если задаться относительной точностью определения параллаксов лучше 100% (параллакс больше ошибки), то даже для близких звёзд, до которых расстояние, по данным Gaia, менее 200 пк, наблюдается отчётливая концентрация к галактическому экватору (рис. 8). Более того, ясно видны даже Магеллановы облака. Картина для близких звёзд не сильно отличается от распределения

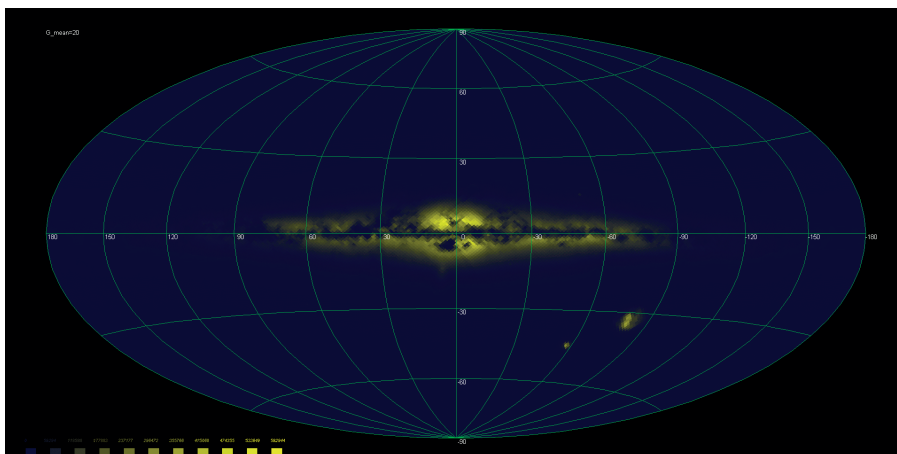


Рис. 7. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд с $G = 20^m$ (максимальная плотность – около 600 тыс. звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

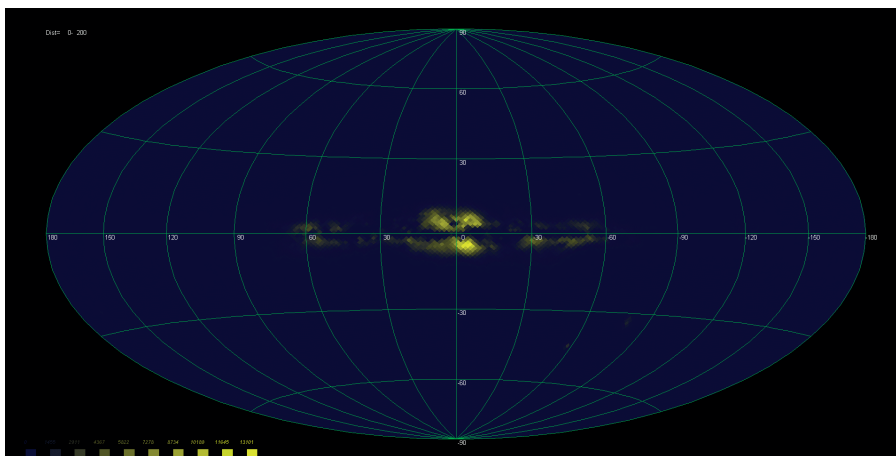


Рис. 8. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллакса $<100\%$) от 0 до 200 пк (максимальная плотность — около 13 000 звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

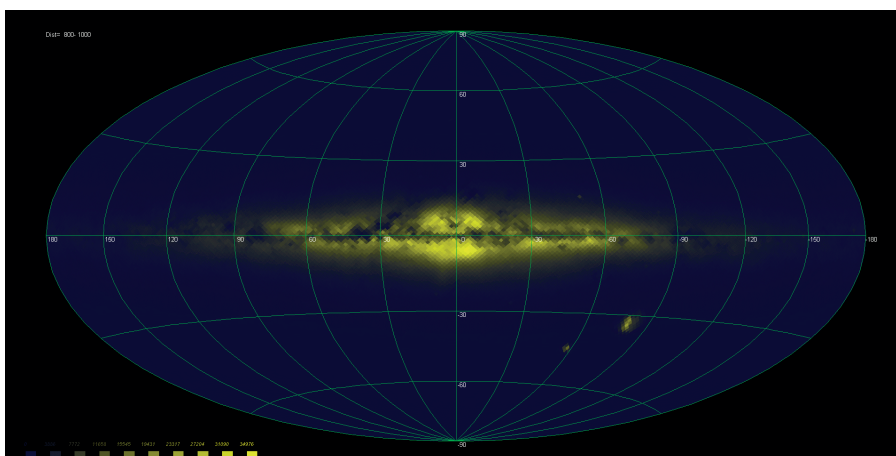


Рис. 9. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллакса $<100\%$) от 800 до 1000 пк (максимальная плотность — около 34 тыс. звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

звёзд с расстояниями от 800 пк до 1 Кпк (рис. 9), да и это распределение, на котором виден балдж Галактики, скорее характерно для очень далёких звёзд (несколько Кпк). Похожий характер сохраняется и для звёзд других расстояний. Это наводит на размышления о недостоверности параллаксов (даже в статистическом плане) для самых близких звёзд, где мы вправе ожидать высокой относительной точности параллаксов в силу их расположения.

Однако если ограничиться звёздами, для которых параллакс определён с точностью 10% и лучше, то картина меняется. Единственный странный результат — опять самые близкие звёзды, где по-прежнему наблюдается их концентрация к экватору. Для других расстояний картина более предсказуема. Звёзды, находящиеся ближе 1 Кпк, равномернее распределены по небесной сфере,

хотя, конечно, прослеживается их концентрация к галактическому диску (рис. 10). Далёкие звёзды чётко показывают диск Галактики (рис. 11).

Распределение среднего показателя цвета звёзд. Весьма любопытно изучение распределения среднего показателя цвета звёзд $Bp-G$ для разных точек небесной сферы (рис. 12). В данном случае для построения максимально подробного изображения высокого разрешения (количество звёзд это позволяет) мы отказались от площадок Heal-Pix. Вместо них используем просто точки изображения. Само изображение имеет размер 2000×1000 точек. Даже беглый взгляд приводит к выводу, что наблюдается “покраснение” цвета звёзд, вызванное пылевой материей. Отчётливо видна волокнистая структура газопылевых облаков. Аналогичная картина наблюдается и для других показателей цвета. Очевидно, что пылевые

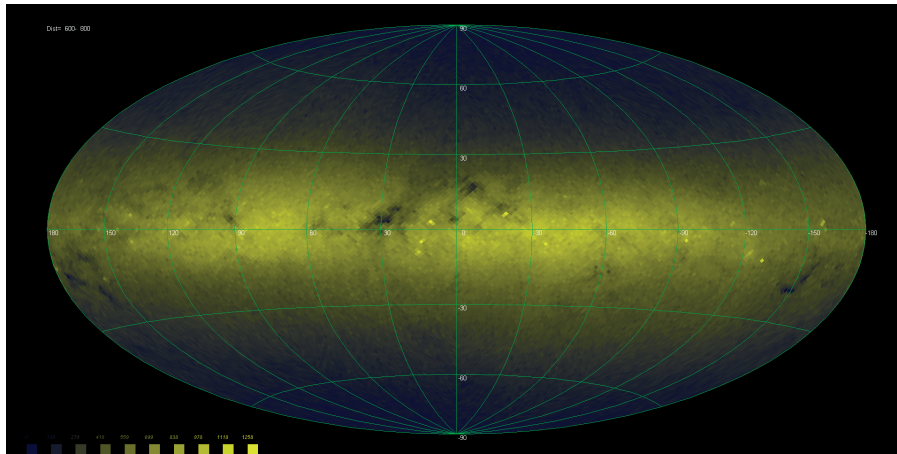


Рис. 10. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллаксов $<10\%$) от 600 до 800 пк (максимальная плотность – около 1200 звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

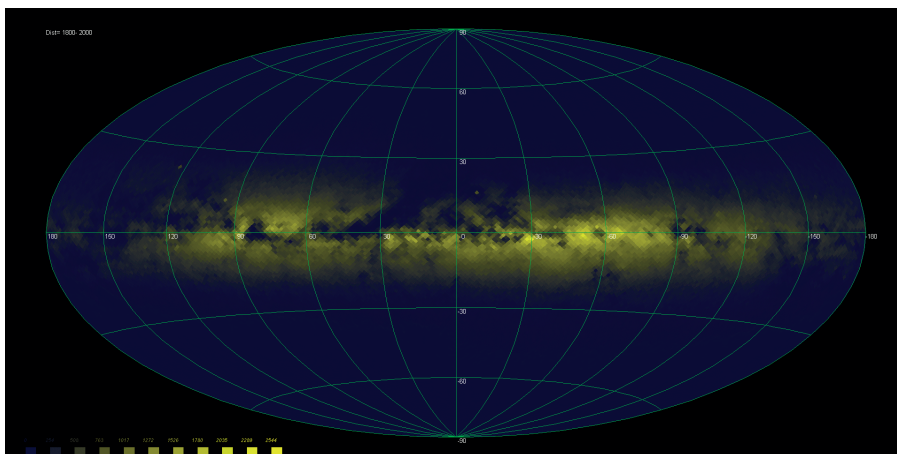


Рис. 11. Распределение Gaia DR3 по небесной сфере для звёзд расстояний (относительная точность параллаксов $<10\%$) от 1.8 до 2.0 Кпк (максимальная плотность – около 2500 звёзд на пиксель, 1 пиксель = 0.83 кв. градуса)

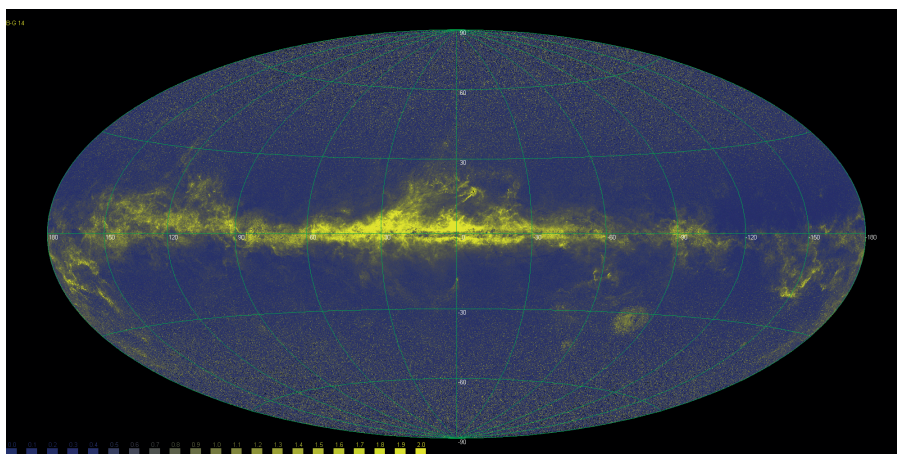


Рис. 12. Значение среднего показателя цвета B_p-G звёзд Gaia DR3 14 звёздной величины G в зависимости от положения на небесной сфере (синий цвет соответствует значению 0.0, жёлтый – 2.0)

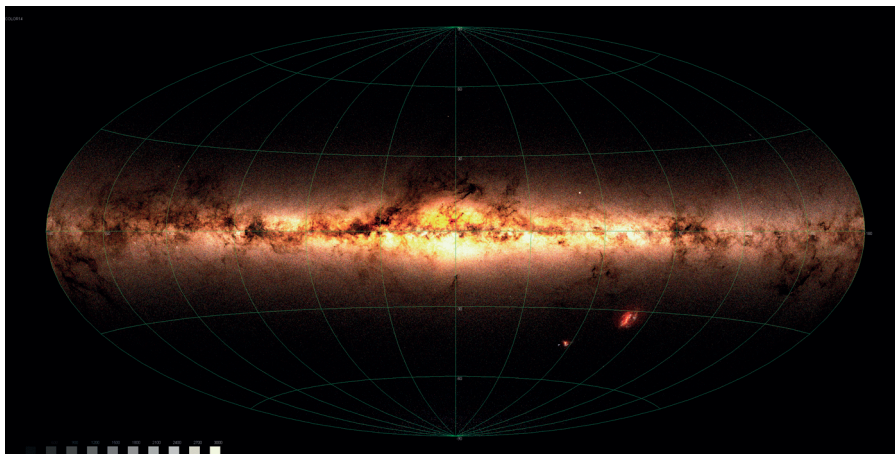


Рис. 13. Псевдоцветное изображение звёзд Gaia DR3 14 звёздной величины G

облака не только вызывают покраснение, но и значительно ослабляют свет звёзд, что следует учитывать при проведении исследований, в которых будет фигурировать звёздная или абсолютная звёздная величина.

Более пристальное внимание к полярным областям показывает, что, во-первых, пылевой материи в этом направлении почти нет, во-вторых, в полярных областях можно заметить как звёзды с высоким показателем цвета (2 и более), так и с низким (0.5–0.7). Скорее всего, это близкие звёзды главной последовательности и белые карлики.

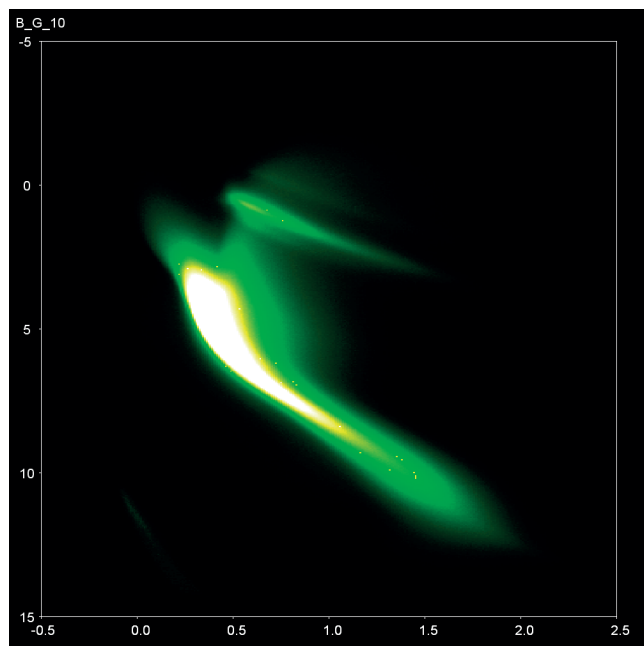


Рис. 14. Диаграмма “показатель цвета V_p-G – абсолютная звёздная величина G ” для звёзд с относительной точностью параллакса лучше 10%

Небесная сфера в квазицветном изображении. Трёхцветная фотометрия позволяет построить псевдоцветные изображения небесной сферы, которые имеют не только познавательную, но и эстетическую и ценность. Действительно, переведём фотометрическую шкалу V_p , G и R_p в шкалу RGB , использующуюся в компьютерных изображениях, и ясно увидим (рис. 13), как происходит поглощение света в пылевых облаках, как распределены звёзды разных спектральных классов по небесной сфере.

ДИАГРАММЫ ГЕРЦШПРУНГА–РЕССЕЛА

Наличие расстояний и многоцветной фотометрии позволяет построить диаграмму Герцшпрунга–Рессела, точнее, диаграмму “показатель цвета – абсолютная звёздная величина”. В качестве показателя цвета можно выбрать V_p-G , V_p-R_p или $G-R_p$. Их связь со стандартным колор-индексом $B-V$ ещё не окончательно откалибрована [16]. Использование звёзд с разной точностью параллакса кардинально меняет всю картину. Действительно, если задаться точностью параллакса в 10% и лучше, то на диаграмме (рис. 14) прекрасно различаются все основные последовательности и даже подпоследовательности. Кроме главной последовательности отчётливо видна ветвь красных гигантов и субгигантов. В левом нижнем углу довольно тонкая область белых карликов. Изображение построено в условных цветах: зелёный цвет максимальной интенсивности соответствует попаданию 250 звёзд в пиксель размером $0.04''$ по абсолютной звёздной величине и $0.01''$ по показателю цвета, жёлтый цвет – уже около 500, а белый – свыше 750 звёзд.

При переходе к звёздам с точностью параллакса лучше 50% картина размывается. Основной эффект – смещение звёзд вниз, в сторону увеличения абсолютной звёздной величины, то есть

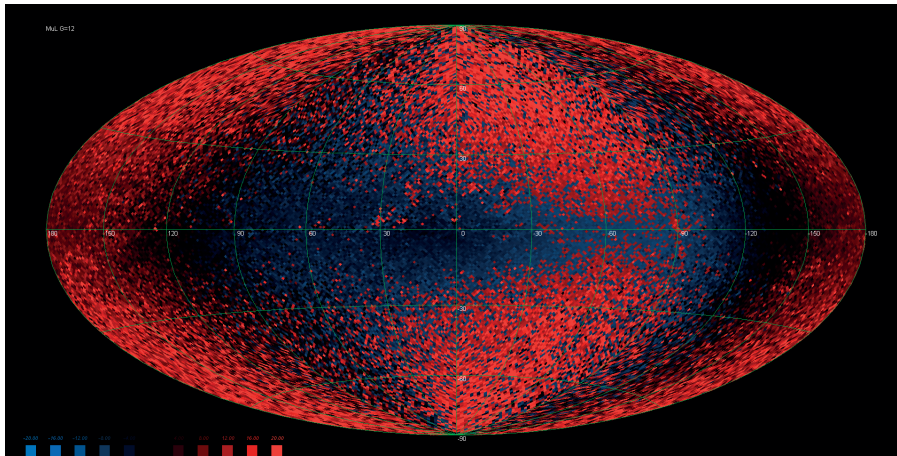


Рис. 15. Поведение собственных движений $\mu_l \cos b$ для звёзд $G = 12$ (от -20 до $+20$ mas/год)

уменьшения светимости. На самом деле звёзды более яркие располагаются на больших расстояниях, а параллаксы Gaia сдвинуты в сторону увеличения, другими словами, расстояния до звёзд оказываются преуменьшенными. Это подтверждается и распределением близких звёзд по небесной сфере, которые на самом деле далёкие, поэтому и концентрируются к галактическому экватору.

СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЁЗД

Поведение собственных движений звёзд разных величин. В каталоге Gaia приводятся только экваториальные собственные движения звёзд $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ . Для звёздно-кинематических исследований не составляет никакого труда перевести их в галактические $\mu_l \cos b$ и μ_b :

$$\begin{aligned} \mu_l \cos b &= \cos \varphi \cdot \mu_\alpha \cos \delta + \sin \varphi \cdot \mu_\delta, \\ \mu_b &= -\sin \varphi \cdot \mu_\alpha \cos \delta + \cos \varphi \cdot \mu_\delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{\sin i \cos(l - L_0)}{\cos \delta}, \\ \cos \varphi &= \frac{\cos b \cos i - \sin b \sin i \sin(l - L_0)}{\cos \delta}, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь i – угол наклона галактического экватора (62.87° на J 2000), а L_0 – разность долгот между направлением на центр Галактики и пересечением небесного и галактического экваторов (32.93°). Так как эти величины используются часто, то при формировании бинарных файлов из текстового каталога их можно сразу сосчитать и записать с целью экономии времени вычислений в дальнейшем.

Перед оценкой звёздно-кинематических параметров посмотрим на поведение собственных

движений в зависимости от используемой звёздной величины. Для собственных движений по долготе (рис. 15, 16) и широте (рис. 17, 18) видно, что у ярких звёзд ($G = 10$) картина комбинированная, присутствуют различные кинематические эффекты, в то время как для слабых звёзд ($G = 20$), очевидно, остаются только общие глобальные кинематические эффекты, такие как вращение Галактики.

Параметры стандартной звёздно-кинематической модели. В качестве первой мы используем широко известную модель Огородникова–Милна [17], подробный вид уравнений этой модели изложен также в [18, 19]. В этой модели поле скоростей звёзд представляется линейным выражением

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \mathbf{M}^+ \times \mathbf{r}, \quad (3)$$

где V – скорость звезды, V_0 – влияние поступательного движения Солнца, $\boldsymbol{\Omega}$ – угловая скорость твердотельного вращения звёздной системы, \mathbf{M}^+ – симметричный тензор деформации поля скоростей.

Модель содержит 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 звёзд;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – 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.

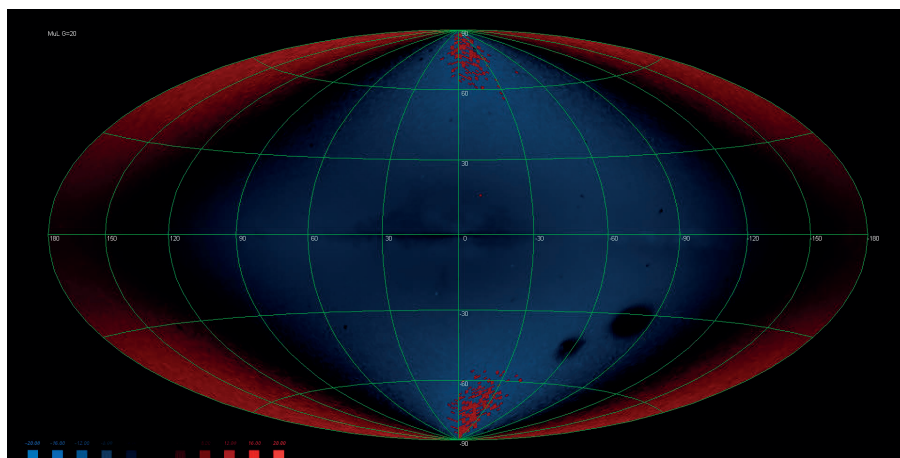


Рис. 16. Поведение собственных движений $\mu_l \cos b$ для звёзд $G = 20$ (от -20 до $+20$ mas/год)

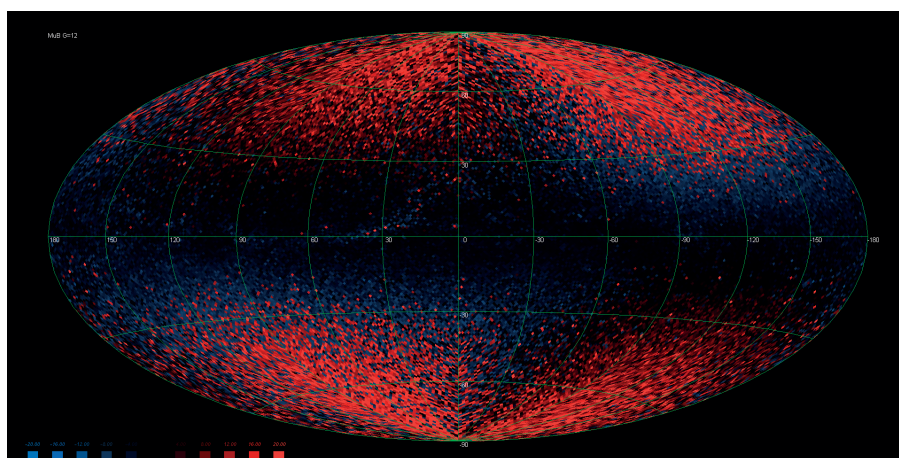


Рис. 17. Поведение собственных движений μ_b для звёзд $G = 12$ (от -20 до $+20$ mas/год)

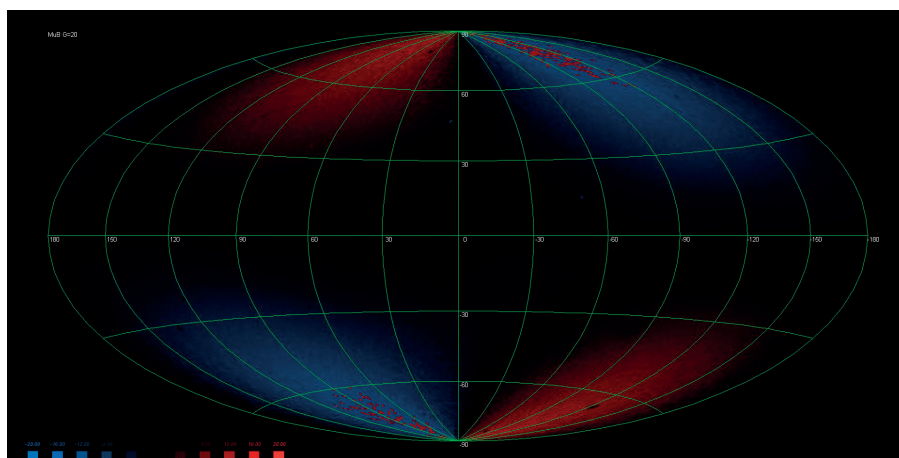


Рис. 18. Поведение собственных движений μ_b для звёзд $G = 20$ (от -20 до $+20$ mas/год)

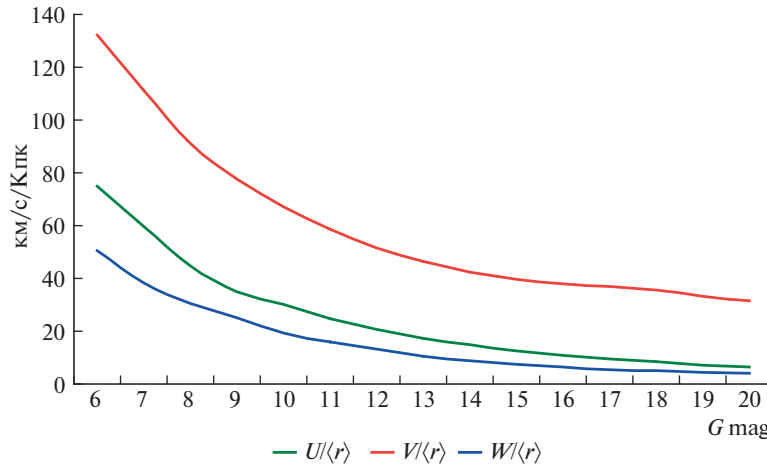


Рис. 19. Зависимость кинематических параметров движения Солнца $U/\langle r \rangle, V/\langle r \rangle, W/\langle r \rangle$ от звёздной величины (км/с/Кпк)

Спроецировав уравнение (3) на орты галактической системы координат, получаем:

$$k\mu_l \cos b = U/r \sin l - V/r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + M_{23}^+ \sin b \cos l - \quad (4)$$

$$- \frac{1}{2} M_{11}^+ \cos b \sin 2l + \frac{1}{2} M_{22}^+ \cos b \sin 2l,$$

$$k\mu_b = U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - W/r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - \frac{1}{2} M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + \quad (5)$$

$$+ M_{23}^+ \cos 2b \sin l - \frac{1}{2} M_{11}^+ \sin 2b \cos^2 l - \frac{1}{2} M_{22}^+ \sin 2b \sin^2 l + \frac{1}{2} M_{33}^+ \sin 2b.$$

В формулах (4) и (5) 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 $M_{33}^* = M_{33}^+ - M_{22}^+$ [18], либо [20], вместо M_{33}^* вводят величину

$$X = M_{33}^+ - \frac{M_{11}^+ + M_{22}^+}{2}. \quad (6)$$

В этом случае уравнения (4) и (5) переписываются в виде

$$k\mu_l \cos b = U/r \sin l - V/r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + M_{23}^+ \sin b \cos l - \frac{1}{2} M_{11}^* \cos b \sin 2l, \quad (7)$$

$$k\mu_b = U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - W/r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - \frac{1}{2} M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + M_{23}^+ \cos 2b \sin l - \frac{1}{4} M_{11}^* \sin 2b \cos 2l + \frac{1}{2} X \sin 2b. \quad (8)$$

Уравнения (7), (8) часто используют для совместного решения по полным собственным движениям какого-либо каталога, при этом если неизвестно расстояние до звёзд, 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 звёзд, для которой производят решение.

В таблицах 1, 2 приведено совместное решение для звёзд Gaia EDR3, а графики на рисунках 19–21 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 звёздной величины, так как имеется полная корреляция между блеском звезды и расстоянием. Самая большая компонента — движение Солнца по оси $Y - V/\langle r \rangle$. Для ярких звёзд 3–6 величин данные параметры определяются ненадёжно, это справедливо и для остальных параметров. Причина — не только небольшое количество звёзд в этом диапазоне (их всё-таки не так мало для уравнений с 11 параметрами), но и пекулярная кинематика близких звёзд. На это обращали внимание исследователи ещё с 1950-х годов [21].

Рассматривая такой важный параметр, как угловая скорость твердотельного вращения системы $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, мы видим также, что для самых ярких звёзд параметры вектора угловой скорости вообще не определяются, а, начиная со звёзд 7 ве-

Таблица 1. Значения компонент скорости движения Солнца и угловой скорости твердотельного вращения в км/с/Кпк, полученные из совместного решения для звёзд 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	9.6 ± 0.0	36.9 ± 0.0	5.5 ± 0.0	0.6 ± 0.0	-0.7 ± 0.0	-12.3 ± 0.0
18	8.4 ± 0.0	35.5 ± 0.0	4.9 ± 0.0	0.4 ± 0.0	-0.6 ± 0.0	-12.1 ± 0.0
19	7.2 ± 0.0	33.2 ± 0.0	4.4 ± 0.0	0.2 ± 0.0	-0.5 ± 0.0	-11.9 ± 0.0
20	6.5 ± 0.0	31.7 ± 0.0	4.2 ± 0.0	0.3 ± 0.0	-0.5 ± 0.0	-11.8 ± 0.0

личины, вектор определяется хорошо и не перпендикулярен плоскости Галактики. Это факт также известен [22]. Интересны следующие обстоятельства. Во-первых, начиная со звёзд 12 вели-

чины, ошибки определяемых параметров становятся чрезвычайно малыми, то есть пекулярные скорости звёзд перестают играть значительную роль. Во-вторых, компоненты вектора вращения ω_1 , ω_2

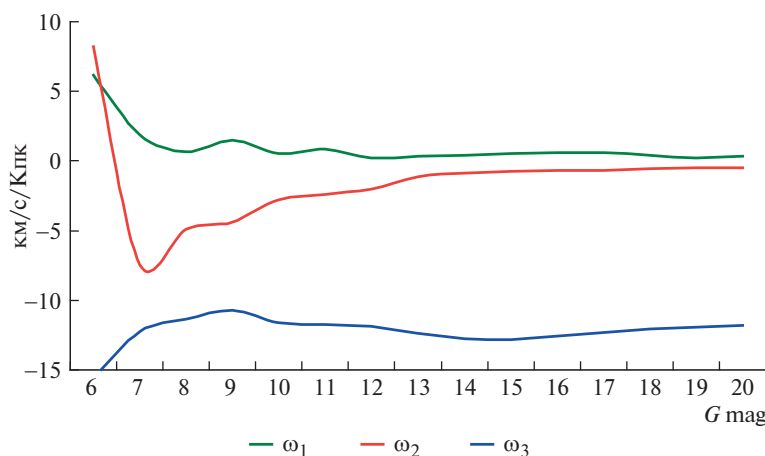


Рис. 20. Зависимость угловой скорости твердотельного вращения ω_1 , ω_2 , ω_3 от звездной величины (км/с/Кпк)

Таблица 2. Значения компонент тензора деформации в км/с/Кпк, полученные из совместного решения для звёзд 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	9.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.1
20	8.6 ± 0.0	0.1 ± 0.0	-0.1 ± 0.0	0.4 ± 0.1	0.6 ± 0.1

значимо отличаются от нуля даже для слабых (и, по-видимому, далёких) звёзд, это 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. Исключе-

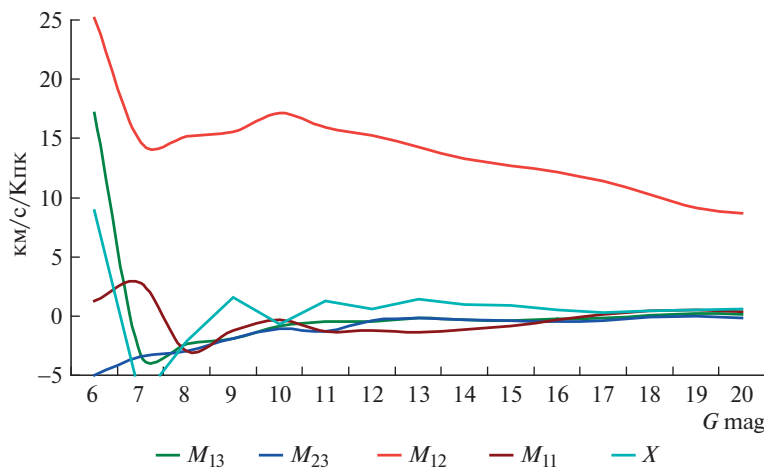


Рис. 21. Зависимость компонент тензора деформации M_{12} , M_{13} , M_{23} , M_{11}^* , X от звёздной величины (км/с/Кпк)

Таблица 3. Значения компонент скорости движения Солнца в км/с и угловой скорости твердотельного вращения в км/с/Кпк, полученные из совместного решения для звёзд 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	12.9 ± 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

ние составляет параметр M_{11} , ответственный за разность растяжений звёздной системы по осям X и Y . Он довольно долго сохраняет ненулевое значение, и лишь для звёзд 16, 17 величины и слабее сильно уменьшается.

Зависимость параметров стандартной звёздно-кинематической модели от расстояний. Анализ распределений звёзд по параллаксам и их точностям показывает, что для звёздно-кинематических исследований, которые нуждаются в расстояниях, следует использовать звёзды с высокой относительной точностью параллаксов. Для этого мы создали подкаталог, состоящий из 98 506 335 звёзд, которые удовлетворяют этому критерию. Объём бинарного файла составил всего 14 Гбайт (по сравнению с 260 полного каталога). Соответственно, почти в 20 раз увеличилась скорость работы с этими данными. Так как пока даже 10%-ная точность параллакса не гарантирует истинного значения параллакса каждой звезды, мы поступили стандартным образом, разбив звёздный материал на сферические слои, удалённые от Солнца на разные расстояния. Для этих групп звёзд решены уравнения в рамках модели Огородникова–Милна и произведено разложение собственных движений по системе векторных сферических функций. Результаты отражены в таблицах 3 и 4. Для компактности расстояния, начиная с 400 пк, приведены не подряд, так как значения изменяются медленно. Полные версии таблиц содержатся в электронном Приложении (http://school.podvorye.ru/astro/GAIA_EDR3/).

В таблице 4 указано дополнительно число звёзд, использовавшихся в решении. Само решение базировалось на усреднённых данных собственных движений и расстояний по 49152 площадкам HealPix ($N = 64$) с их равными весами. Рисунки 22–24 иллюстрируют содержание таблиц 3 и 4.

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

Вообще говоря, считается, что упрощённая линейная модель Оорта–Линдблада или полная Огородникова–Милна может использоваться до расстояний 1–1.5 Кпк [17]. Но мы видим, что в принципе параметры Оорта $A = M_{12}$ и $B = \omega_3$ хоть и меняются с расстоянием, но очень плавно, сохраняя свой общий характер. Прочие параметры – как компоненты угловой скорости ω_1 , ω_2 , так и тензора деформации M_{11}^* , M_{13} , M_{23} , X – с увеличе-

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

r	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	372226
100–200	19.4 ± 0.3	-1.3 ± 0.3	-1.2 ± 0.3	-2.3 ± 0.5	0.1 ± 0.5	1862090
200–300	15.7 ± 0.1	-0.7 ± 0.1	-0.8 ± 0.1	-5.1 ± 0.2	1.6 ± 0.2	3515477
300–400	14.7 ± 0.1	-0.5 ± 0.1	-0.3 ± 0.1	-5.9 ± 0.2	2.2 ± 0.1	4696935
500–600	14.5 ± 0.1	-1.1 ± 0.1	-0.6 ± 0.1	-6.5 ± 0.1	2.1 ± 0.1	5245459
700–800	14.1 ± 0.1	-0.4 ± 0.1	0.8 ± 0.1	-5.3 ± 0.1	2.1 ± 0.1	5272993
900–1 К	13.5 ± 0.1	-0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.1	-4.1 ± 0.1	1.8 ± 0.1	5235217
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	4741504
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	3871940
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	2839861
2.1–2.2	11.1 ± 0.1	-0.4 ± 0.1	-1.2 ± 0.1	-2.5 ± 0.2	1.2 ± 0.1	1655812
2.4–2.5	10.3 ± 0.1	-0.7 ± 0.1	-0.5 ± 0.1	-2.4 ± 0.2	1.2 ± 0.2	1041495

нием расстояния стремятся к значениям, близким к нулю. Разве 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 , направленной по вращению Галактики. Объяснение, вероятно, может быть таким: скорость движения Солнца оценивается относительно групп

звёзд на разных расстояниях, а эти группы сами движутся относительно друг друга, в плоскости Галактики по направлению, перпендикулярному её центру; эти различия сильны и имеют большой систематический ход. Аналогичные результаты получены нами ранее по каталогу Gaia DR2 with RV [22], но поведение параметра V было несколько иным. Его значение оставалось стабильным (около 22 км/с) до расстояний 800 пк, далее начи-

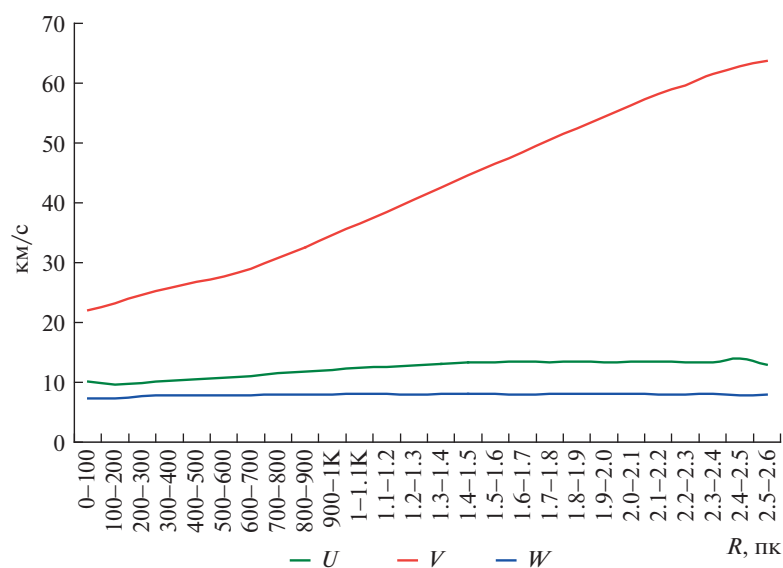


Рис. 22. Зависимость кинематических параметров движения Солнца U , V , W от расстояния до звёзд (км/с)

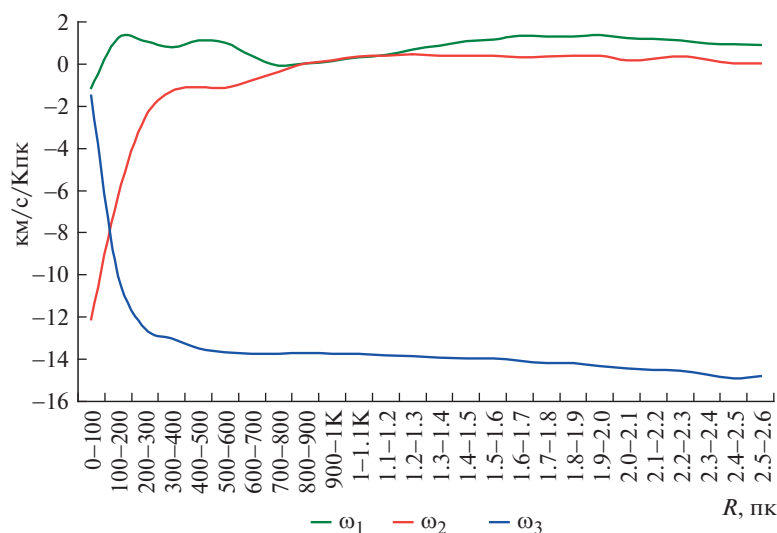


Рис. 23. Зависимость угловой скорости твердотельного вращения ω_1 , ω_2 , ω_3 от расстояния до звёзд (км/с/Кпк)

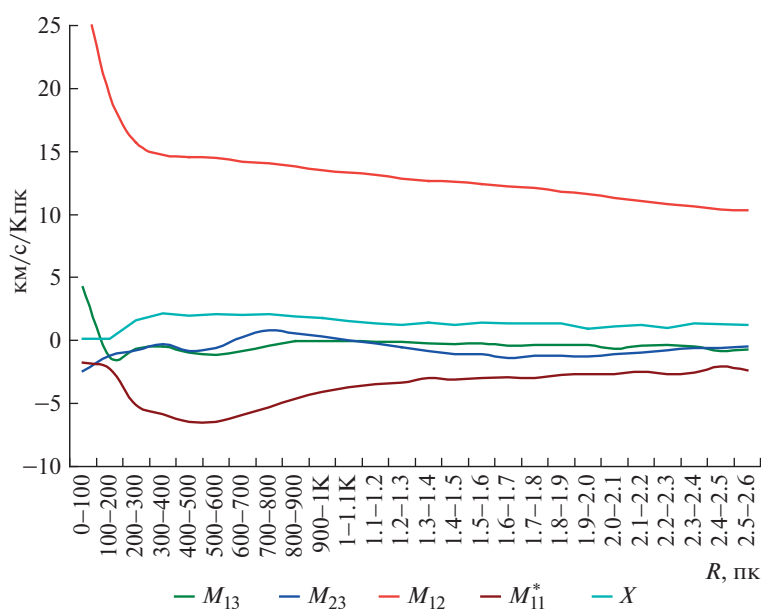


Рис. 24. Зависимость компонент тензора деформации M_{12} , M_{13} , M_{23} , M_{11}^* , X от расстояния до звёзд (км/с/Кпк)

нался линейный рост. В нашем случае мы сразу наблюдаем линейный рост.

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

Данная работа носит подготовительный характер с прицелом на обработку более точных (особенно в параллаксах) данных финальных

версий каталога Gaia, которые станут доступны в начале 2022 г. Тем не менее даже этот материал даёт богатую почву для различных статистических и кинематических оценок каталога как единого целого.

Дополнительный иллюстративный материал можно получить по ссылке http://school.podvoroye.ru/astro/GAIA_EDR3/.

ЛИТЕРАТУРА

1. ESA. Gaia. <https://sci.esa.int/web/gaia>
2. ESA. Gaia Early Data Release 3. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>

3. ESA. Gaia Colloboration. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties // *Astron. & Astrophys.* 2021. V. 649. № A1. P. 1–20.
4. *Michalik D., Lindegren L., Hobbs D.* The Tycho-Gaia astrometric solution. How to get 2.5 million parallaxes with less than one year of Gaia data // *Astron. & Astrophys.* 2015. V. 574. № A115. P. 1–8.
5. *Katz D., Sartoretti P., Cropper M. et al.* Gaia Data Release 2. Properties and validation of the radial velocities // *Astron. & Astrophys.* 2019. V. 622. № A205. P. 1–19.
6. *Zacharias N., Monet D.G., Levine S.E. et al.* The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD). American Astronomical Society 205th Meeting // *Bulletin of the American Astronomical Society.* 2004. V. 36. P. 1418.
7. *Roeser S., Demleitner M., Schilbach E.* The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* 2010. V. 139. № 6. P. 2440–2447.
8. *Бартедьев О.В.* Современный Фортран. Изд. 3-е, доп. и перераб. М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000.
9. Gaia. Chapter 13: https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GEDR3/Gaia_archive/chap_datamodel/
10. *Brown A., Vallenari A., Prusti T. et al.* Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties // *Astron. & Astrophys.* 2021. V. 649. № A1. P. 20.
11. *Montegriffo P., De Angeli F., Bellazzini M. et al.* Gaia EDR3 passbands. 2020. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/edr3-passbands>
12. *Johnson H.L., Morgan W.W.* Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the Revised System of the Yerkes Spectral Atlas // *Astroph. J.* 1953. V. 117. № 3. P. 313–352.
13. *Цветков А.С.* Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005.
14. *Riello M., De Angeli F., Evans D.W. et al.* Gaia Early Data Release 3 – Photometric content and validation // *Astron. & Astrophys.* 2021. V. 649. № A3. P. 1–33.
15. *Gorski K.M., Hivon E., Banday A.J. et al.* HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // *Astroph. J.* 2005. V. 622. № 2. P. 759–771.
16. *Casagrande L., VandenBerg D.* On the use of Gaia magnitudes and new tables of bolometric corrections // *Mon. Not. of the Royal Astron. Soc.: Letters.* 2018. V. 479. № 1. P. L102–L107.
17. *Огородников К.Ф.* Динамика звёздных систем. М.: Физматгиз, 1965.
18. *du Mont B.A.* A three-dimensional analysis of the kinematics of 512 FK4/FK4 Sup. stars // *Astron. & Astrophys.* 1977. V. 61. № 127 P. 127–132.
19. *Рыбка С.П.* Кинематический анализ данных о красных звёздах-гигантах в окрестности Солнца // *Кинематика и физика небесных тел.* 2004. № 5. С. 437–443.
20. *Витязев В.В., Попов А.В., Цветков А.С. и др.* Кинематика звёзд каталога TGAS (Gaia DR1) // *Письма в АЖ.* 2018. № 4. С. 265–276.
21. *Шацова Р.Б.* Асимметрия собственных движений GC Босса // *Учёные записки ЛГУ.* 1950. № 136. С. 115–165.
22. *Цветков А.С., Амосов Ф.А.* Кинематические параметры поля скоростей звёзд области вокруг Солнца радиусом до 3 Кпк по данным каталога Gaia // *Письма в АЖ.* 2019. № 7. С. 517–528.