АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023, том 100, № 9, с. 820–833

КАЛИБРОВКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ КАТАЛОГА GAIA DR3 ПО ДАННЫМ О ШИРОКИХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДАХ ПОЛЯ ГАЛАКТИКИ

© 2023 г. Д. А. Ковалева[1,*]

[1]*Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия*

******E-mail: dana@inasan.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.
После доработки 28.07.2023 г.
Принята к публикации 28.08.2023 г.

Проанализирован каталог широких двойных звезд [1], созданный на основании данных Gaia EDR3 и включающий более миллиона пар, с привлечением данных Gaia DR3, независимо полученных для их компонентов. Показано, что пространственная неоднородность каталога отражает закон сканирования Gaia. Исследовано изменение пространственной плотности двойных звезд каталога с увеличением расстояния до Солнца. Путем сравнения с модельным распределением показано, что в каталоге содержится приблизительно в 2.5 раза меньше двойных звезд, чем ожидалось бы в отсутствие пространственной неполноты. Подтверждено, что радиус пространственной полноты каталога в среднем близок к 200 пк и зависит от абсолютной звездной величины главного компонента. Пространственная плотность двойных звезд в каталоге слабо зависит от разности звездных величин компонентов и существенно зависит от физического расстояния между компонентами. Неполнота каталога в отношении пар с расстоянием между компонентами меньше 100 а.е. возникает уже на расстоянии 25 пк от Солнца. Сравнение независимо определенных в рамках каталога Gaia DR3 характеристик компонентов одной и той же пары позволило исследовать, насколько связана вероятность неслучайного объединения компонентов с близостью их характеристик. Высокая величина связи степени согласия характеристик с надежностью пары обнаружена для лучевых скоростей. Качественное согласие наблюдается для оценок металличностей [Fe/H] и, в меньшей степени, для оценок поглощения A_G. Для возрастов звезд согласие не обнаружено, что говорит об их большой неопределенности в ансамбле, состоящем в основном из звезд главной последовательности. При этом оценки возрастов для пар с проэволюционировавшими компонентами показывают существенно лучшее согласие, чем для ансамбля в целом. С использованием параметров компонентов пар из Gaia DR3 выполнена независимая оценка неопределенностей значений лучевых скоростей и металличностей в зависимости от видимой звездной величины G источников. Предложены оценки вероятных медианных значений ошибок лучевых скоростей и металличностей источников Gaia DR3. В зависимости от видимой звездной величины они превышают медианные значения ошибок, приведенных в каталоге: для лучевых скоростей в 1.5–3 раза, для металличностей [Fe/H] в 7–25 раз. Статья основана на докладе, сделанном на астрофизическом мемориальном семинаре “Новое в понимании эволюции двойных звезд”, приуроченном к 90-летию профессора М.А. Свечникова.

Ключевые слова: двойные звезды, космические миссии: Gaia

DOI: 10.31857/S0004629923090074, **EDN:** RKNNYP

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что распространенность двойных и кратных звезд в Галактике, а также их свойства, определяются характеристиками процесса звездообразования и, в определенной мере, динамическим взаимодействием звезд в группах с общим происхождением [2–4]. Разделение вкладов характеристик образующейся популяции и их изменения в ходе динамической эволюции – интересная и нетривиальная задача (см., напр., обсуждение в работах [5, 6]). Статистические свойства двойных звезд, получаемые из наблюдений, позволяют ввести ограничения при решении задач, связанных с формированием и эволюцией звездной популяции Галактики (см., напр., работы [3, 7–10].

Публикация каждого нового релиза данных космического проекта Gaia [11] инициирует получение новых результатов в галактической астрономии и связанных с ней областях астрономии и астрофизики. Это касается, в том числе, и исследования популяции двойных звезд в Галактике. Так, данные Gaia открыли возможность выделения и исследования популяции широких двойных, практически не искаженного эффектами наблюдательной селекции. Проведенные разны-

ми авторами исследования независимо продемонстрировали, в частности, яркую особенность популяции двойных звезд поля – присутствие так называемого "пика близнецов" на распределении по отношению масс компонентов $q = M_{\min}/M_{\max}$ [12, 13]. Ранее такой пик (избыточное, относительно гладкого распределения, количество двойных звезд с близкими массами компонентов) обнаруживали для спектроскопических двойных звезд [6, 14], и предположительно объясняли конкурентной аккрецией на тесную двойную протозвезду, окруженную общей оболочкой или аккреционным диском. Достоверное существование "пика близнецов" для двойных звезд с расстоянием между компонентами вплоть до тысяч астрономических единиц заставляет обсуждать возможные механизмы увеличения расстояния между компонентами после выравнивания их масс [12]. Вероятно, это происходило в ходе динамических взаимодействий в родительском звездном скоплении до его распада и перемещения звезд-близнецов в поле. При этом расстояние между компонентами таких пар накладывает ограничения на условия в скоплении.

С использованием уточненных астрометрических наблюдений третьего раннего релиза данных Gaia [1, 15] опубликовали список вероятных членов широких двойных звезд в пределах 1 кпк от Солнца, содержащий свыше миллиона записей. Пары были выделены в результате анализа пространственной и кинематической информации о вероятных компонентах, с учетом вероятности случайного совпадения направления движения звезд. В июне 2022 г. был опубликован полный третий релиз данных Gaia, содержащий, в частности, средние лучевые скорости для 33 млн. звезд, а также обширный массив оценок астрофизических характеристик, выполненных для больших выборок звезд по спектрам низкого и среднего разрешения. Кроме того, опубликован каталог т.н. "неодиночных" (non-single) источников Gaia, решение для движения которых предполагает наличие орбитального движения вследствие присутствия невидимого спутника. В силу своего пилотного характера список неодиночных звезд имеет сложную функцию селективности [16]. При этом ранее было показано, что возможности исследования с Gaia двойных звезд с угловым расстоянием, близким к пределу разрешения Gaia, а также двойных с выраженным орбитальным движением, ограничены [17, 18].

В настоящей работе мы используем данные Gaia DR3 для исследования и независимого тестирования каталога вероятных широких двойных звезд [1].

В разделе 2 мы обсуждаем характеристики каталога широких двойных звезд и его дополнение данными Gaia DR3. Раздел 3 посвящен сравнению характеристик компонентов пар, опубликованных в рамках Gaia DR3, и исследованию пространственной полноты каталога широких пар. В разделе 4 обсуждается использование независимо определенных параметров компонентов пар для независимой оценки неопределенностей лучевых скоростей и металличностей в Gaia DR3. Раздел 5 содержит предложенные нами выводы.

2. ДАННЫЕ

Каталог широких двойных звезд [1] представляет собой самый большой каталог вероятных двойных звезд, он однороден и хорошо описан. Каталог содержит информацию о парах звезд, расположенных на расстояниях до 1 кпк от Солнца со взаимными разделениями от 10 а.е. до 1 пк, и имеющих согласующиеся собственные движения. При этом тангенциальная составляющая относительной скорости компонентов и расстояние между компонентами таковы, что предполагают низкую вероятность случайного совпадения скоростей. Численной характеристикой такой вероятности авторы каталога выбрали метрику R_chance_alignment, причем для пар, рассматриваемых как действительные, R_chance_alignment ≤ 0.1. Этому условию удовлетворяют 1 023 441 пар звезд из 1 571 545 пар каталога.

Обсудим функцию селективности каталога [1], обусловленную методом его создания. Ее формирует селективность каталога источников Gaia EDR3, включая его разрешающую способность, зависящую от разности блеска источников, приблизительно можно утверждать, что источники независимо от разности блеска ΔG разрешаются на расстояниях от $2''$; на расстояниях от $1''$ разрешаются источники с разностью блеска $\Delta G < 4^m$. Граница области неполноты при этом является размытой. Этот эффект нарушает полноту выборки двойных на расстояниях до приблизительно 200 пк от Солнца. Можно показать, что граница области неполноты, обусловленной разрешающей способностью Gaia, зависит от закона сканирования, а не от плотности звездного поля, как можно было бы ожидать. На левой панели рис. 1 показано распределение на небесной сфере минимального углового расстояния $\theta_{\min}$ (в секундах дуги) между компонентами пары в зависимости от галактических координат (l, b) первого компонента. Отчетливо видны следы предпочтительных направлений сканирования. Аналогичный эффект сохраняется и для тангенциальной проекции минимального линейного расстояния между компонентами (правая панель рис. 1). Можно уверенно рассчитывать на уменьшение этого эффекта при использовании последующих релизов данных Gaia. При этом следует отметить, что ука-

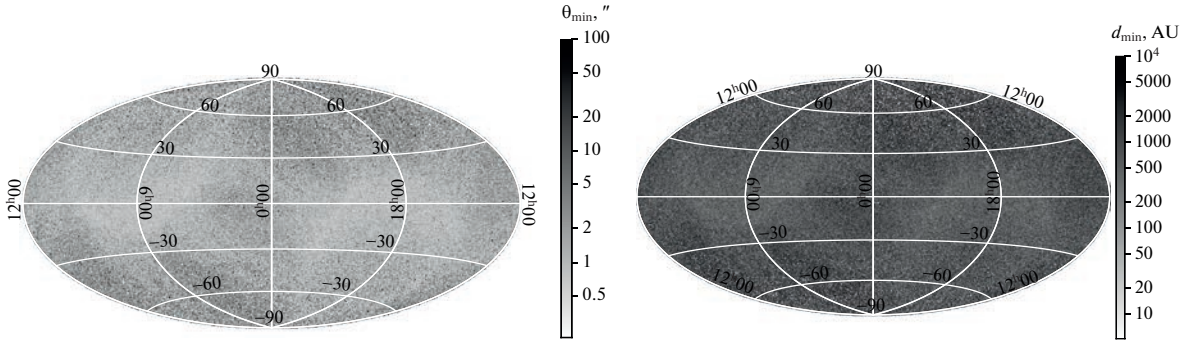

Рис. 1. Зависимость углового разрешения от закона сканирования Gaia. Левая панель – минимальное угловое разделение между компонентами широких пар каталога [1] в зависимости от галактических координат (l, b). Правая панель – то же, но для минимального значения тангенциальной проекции линейного расстояния между компонентами.

занная зависимость не связана с распределением по небесной сфере источников каталога, которое отражает характер распределения звезд в Галактике (см. рис. 1 в посвященной созданию каталога статье).

На более далеких расстояниях действует иной эффект селекции: из рассмотрения исчезают пары, один или оба компонента которых слабее предельной звездной величины Gaia. И для этой области неполноты граница не является четкой, для разных областей неба предельная величина $G_{\rm lim}$ может варьироваться в пределах $19–21^m$. При создании каталога авторы не использовали фильтров по качеству астрометрического и/или фотометрического решения (за исключением ограничения на относительную ошибку тригонометрического параллакса), которые эффективно отсеивают звезды с выраженным орбитальным движением. Однако ухудшение качества астрометрического решения для подобных звезд само по себе могло в некоторых случаях приводить к искажениям значений астрометрических параметров и необнаружению пары как вероятной. Косвенным указанием на такую возможность служит обнаруженное для звезд каталога занижение номинальных ошибок параллакса у тесных компонентов. Кроме упомянутых эффектов, авторы при создании каталога сознательно исключили из каталога источники в разрешенных тройных системах, движущиеся группы и звездные скопления.

Таким образом, полнота представленной каталогом [1] выборки двойных звезд в пространстве параметров ограничена и искажена рядом факторов. Тем не менее он обладает высокой степенью однородности и является самым представительным из известных списков двойных звезд, что делает его привлекательным объектом для исследования.

При создании каталога [1] информация о лучевых скоростях звезд – вероятных компонентов пар – никак не учитывалась. Лучевые скорости для более чем 33 миллионов источников [19] опубликованы в рамках основного каталога Gaia DR3; для 122 003 пар из исследуемого каталога лучевые скорости доступны для обоих компонентов. Мы сопоставляем информацию о лучевых скоростях Gaia DR3 для вероятных компонентов пар. При этом средняя номинальная ошибка определения лучевых скоростей RV отдельных источников для ансамбля звезд каталога составляет $\epsilon(RV) \approx 2.6$ км/с.

В рамках Gaia DR3 выполнялись оценки астрофизических характеристик источников Gaia [20, 21], основанные на комбинации астрометрических, фотометрических и, в определенных случаях, спектроскопических данных с моделями звездной эволюции, учитывающие модель распределения звезд в Галактике. При этом комплекс астрофизических характеристик для каждой звезды определялся одновременно таким образом, чтобы наилучшим образом удовлетворять наблюдательным и априорно заданным параметрам. Каталог широких пар дает возможность внешней оценки точности полученных астрофизических параметров в предположении, что компоненты имеют одинаковое происхождение, близкие возрасты, содержание химических элементов, и межзвездное поглощение для них должно оказываться сходным. Для 161 944 пар из каталога для обоих компонентов имеются оценки возрастов, для 666 903 пар – оценки металличности [Fe/H] и поглощения A_G. Эти оценки получены без использования спектроскопической информации. В рамках Gaia DR3 для астрофизических характеристик приводятся наиболее вероятные значения и нижняя и верхняя граница диапазона значений, соответствующие первому и третьему квартилям распределения вероятности. Вероятный диапазон

значений при этом асимметричен относительно точечной оценки, но если использовать в качестве характерной ошибки половину разности между наибольшим и наименьшим из граничных значений, то средняя точность определения возраста для источников каталога широких пар $\epsilon(Age) \approx 3.8$ млн. лет; для оценок металличности средняя указанная точность $\epsilon[\mathrm{Fe/H}] \approx 0.1$, и для поглощения $\epsilon(A_G) \approx 0.2^m$.

Значения металличности $[\mathrm{Fe/H}]_s$, выполненные с использованием спектроскопических данных, доступны для обоих компонентов 2400 пар. Мы не будем обсуждать их в рамках настоящей работы.

В дальнейшем анализе мы используем также геометрические оценки r_{geo} расстояний до звезд каталога [1] из каталога вероятных расстояний до звезд Gaia EDR3 [22].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Сравнение характеристик компонентов

Согласие независимо определенных характеристик вероятных компонентов пар можно интерпретировать с двух точек зрения. Первая из них – это тестирование гипотезы об истинной двойственности. Вторая точка зрения – тестирование оценок независимо определенных характеристик. В обоих случаях предполагается, что лучевые скорости RV, оценки возрастов Age, металличности [Fe/H], поглощения A_G у компонентов двойной звезды должны совпадать. Очевидно, что такое предположение может быть заведомо неверным по крайней мере в отношении лучевых скоростей, если в системе присутствует орбитальное движение. Максимальный вероятный вклад орбитального движения в лучевые скорости компонентов каталога [1] может в несколько раз превышать среднюю ошибку лучевой скорости и составлять десятки км/с. Такую оценку можно получить, выбрав из списка звезд с известными орбитами те, которые должны войти в каталог широких пар по формальным критериям (угловое расстояние между компонентами и расстояние до Солнца), рассчитав для них среднюю скорость движения по орбите. С использованием каталога астрометрических орбит двойных звезд [23], дополненного данными Gaia EDR3 [18], мы обнаружили, что для 603 двойных звезд с известными орбитами, удовлетворяющих критериям отбора каталога широких пар, расчетные средние скорости движения по орбите находятся в диапазоне от 0.1 до 80 км/с при медианном значении 2.8 км/с.

Для 178 453 пар каталога доступны оценки масс обоих компонентов, и можно оценить среднюю скорость движения по орбите, определив период обращения пары на основании третьего закона Кеплера. В предположении случайной ориентации круговых орбит в пространстве проекция физического разделения между компонентами на тангенциальную плоскость в среднем составляет $0.8a$, где a – большая полуось орбиты. Полученные таким образом оценки средних скоростей находятся в диапазоне от 0 до 8 км/с, медианное их значение 0.7 км/с, и для 99% пар полученные скорости меньше 2.7 км/с – величины, близкой к средней номинальной ошибке определения лучевой скорости в каталоге. При этом наблюдается зависимость вероятной скорости движения по орбите от расстояния до системы и, в связи с этим, от видимой звездной величины главного компонента: на меньших расстояниях от Солнца могут быть разрешены более тесные системы с более коротким периодом обращения. На рис. 2 показан характер этих зависимостей. Столбцы гистограммы отражают медианное значение ожидаемой орбитальной скорости для пар в разных диапазонах расстояний до Солнца и с разной видимой величиной главного компонента. Это медианное значение изменяется от примерно 2 км/с для самых близких и ярких пар (ближе 100 пк и/или со звездной величиной главного компонента $G < 6^m$) до менее чем 1 км/с для пар дальше 300 пк и/или со звездной величиной главного компонента $G > 10^m$.

Мы исследуем распределение медианного значения модулей разности ΔRV_c, $\Delta[\mathrm{Fe/H}]$, $\Delta Age/Age$, ΔA_G с изменением $R_\mathrm{chance_align}$. На рис. 3 диапазон значений метрики $R_\mathrm{chance_align}$ ограничен значением 1.1, достаточным для демонстрации общего тренда. Пары с $R_\mathrm{chance_align} < 0.1$ можно с высокой вероятностью считать действительными. В качестве характеристики различия лучевых скоростей ΔRV_c используется приведенная разность лучевых скоростей компонентов 1, 2 с учетом зависимости величины проекции скорости RV от координат источника (l, b). Пространственные скорости i-компонентов определяются как

$$\begin{bmatrix} U^i \\ V^i \\ W^i \end{bmatrix} = RV^i \begin{bmatrix} \cos l^i \cos b^i \\ \sin l^i \cos b^i \\ \sin b^i \end{bmatrix} + \frac{\kappa \mu_l^i}{\varpi^i} \begin{bmatrix} -\sin l^i \\ \cos l^i \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{\kappa \mu_b^i}{\varpi^i} \begin{bmatrix} -\cos l^i \sin b^i \\ -\sin l^i \sin b^i \\ \cos b^i \end{bmatrix}.$$

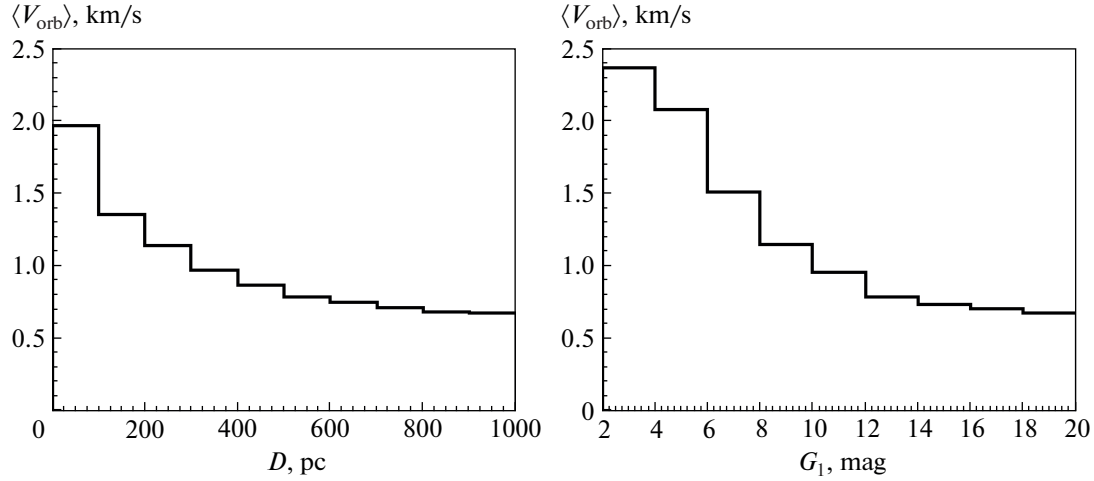

Рис. 2. Связь медианной ожидаемой скорости движения по орбите с расстоянием D до главного компонента системы (левая панель) и с видимой звездной величиной главного компонента G (правая панель).

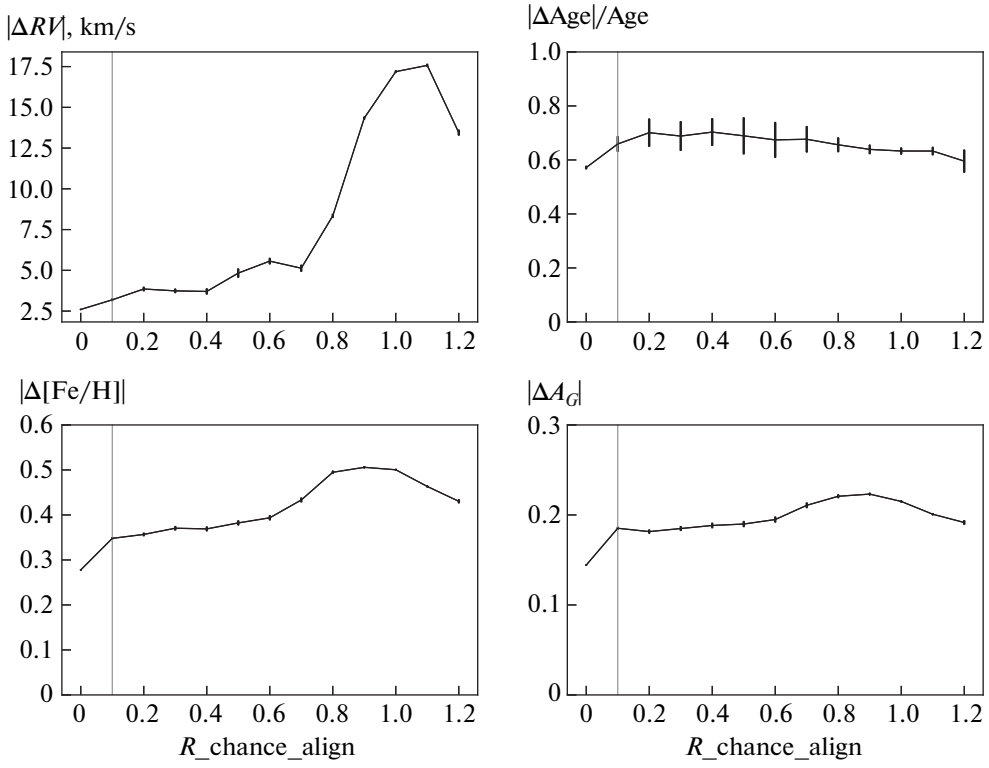

Рис. 3. Связь медианного модуля разности значений характеристик, независимо определенных для компонентов пары, и метрики вероятности случайного совпадения кинематических характеристик компонентов R_chance_align. Слева: разность приведенных лучевых скоростей компонентов (вверху) и разность металличностей (внизу). Справа: разность возрастов в долях возраста главного компонента (вверху) и разность поглощения в полосе G (внизу). Вертикальной серой линией отмечено максимальное значение R_chance_align для надежных пар. Вертикальными барами обозначена величина статистической ошибки.

Затем вычисляется лучевая скорость одного из компонентов (для определенности первого), приведенного к координатам компонента 2:

$$RV_c^1 = U^1 \cos l^2 \cos b^2 + V^1 \sin l^2 \cos b^2 + W^1 \sin b^2.$$

Полученная приведенная разность лучевых скоростей $\Delta RV_c = \left|RV_c^1 - RV^2\right|$ свободна от эффекта проекции.

На рис. 3 приведены данные, характеризующие сходство характеристик, независимо опреде-

ленных для компонентов пар каталога [1] в рамках Gaia DR3. Зависимость этого сходства от вероятности неслучайности пары оказывается интересным диагностическим инструментом.

Так, лучевые скорости (левая верхняя панель рис. 3) демонстрируют явную связь с метрикой вероятности (не)случайности R_chance_align. Эта метрика может принимать значения, большие единицы, но мы ограничиваем рисунки значением R_chance_align = 1.1, поскольку наиболее интересно сравнение пар звезд с R_chance_align < 0.1 ("надежных" двойных) и R_chance_align ≈ 1 (с высокой вероятностью случайных). Медианная разница приведенных лучевых скоростей для надежных пар (и для пар вплоть до R_chance_align ≈ 0.5 оказывается в 4–6 раз ниже, чем для случайных комбинаций звезд.

Из астрофизических характеристик лучшее согласие показывает металличность [Fe/H] компонентов (левая нижняя панель рис. 3): для надежных пар медианная разность металличностей оказывается в два раза ниже, чем для случайных пар. Для поглощения A_G (правая нижняя панель) различие медианных разностей менее значимо, но заметно.

Оценки возрастов из Gaia DR3, с другой стороны, не показывают никакой корреляции с вероятностью неслучайности пары. На правой верхней панели приведено медианное относительное различие возрастов в долях возраста более яркого из компонентов.

Распределения разностей параметров компонентов (кроме возрастов) указывают на то, что заметная доля истинных пар присутствует в ансамбле до значений R_chance_align < 0.6.

Величина R_chance_align имеет статистический характер и связана с наблюдательными и физическими характеристиками пар в каталоге [1] (угловым расстоянием между компонентами ρ и проекцией физического расстояния между компонентами S_p) неоднозначным образом. Рассмотрим зависимость ΔRV_c, Δ [Fe/H], $\Delta Age/Age$, ΔA_G для компонентов пары в Gaia DR3, от ρ (рис. 4), S_p (рис. 5). Угловое расстояние между компонентами представлено в секундах дуги (логарифмическая шкала), проекция линейного расстояния между компонентами на тангенциальную плоскость – в а.е. (линейная шкала). Такой выбор шкал позволит нам далее обсудить некоторые интересные эффекты.

На рис. 4 увеличение значения ΔRV_c при малых значениях ρ (верхняя левая панель рисунка) не имеет соответствия на диаграмме $\Delta RV_c - S_p$ (верхняя левая панель рис. 5) и, по-видимому, связана со снижением точности определения лучевых скоростей при взаимном блендировании близко расположенных компонентов. Совпадение характеристик компонентов [Fe/H], Age, A_G при ρ < 1.5" объясняется наблюдательной селекцией: на таких угловых расстояниях в Gaia могут разрешаться только источники с разностью блеска $\Delta G \sim 0^m$, т. н. "близнецы". Применение одного и того же алгоритма к двум источникам с одинаковыми наблюдательными характеристиками приводит к идентичным значениям [Fe/H], Age, A_G. При $1.5'' \lesssim \rho \lesssim 3''$, однако, начинают разрешаться пары с компонентами, различающимися по блеску, и становится заметен вклад блендирования, который при больших ρ исчезает. Интересно, что связанный с блендированием компонентов пик Δ[Fe/H], $\Delta Age/Age$, ΔA_G тем резче, чем ярче выражена зависимость разности параметров от R_chance_align (рис. 3): он значителен для Δ[Fe/H], слабее выражен для ΔA_G и отсутствует для $\Delta Age/Age$. Можно считать это еще одним независимым указанием на сравнительную внутреннюю точность метода оценки астрофизических параметров Gaia DR3 в отношении разных параметров.

С увеличением углового расстояния между компонентами медианные значения ΔRV_c, Δ[Fe/H], ΔA_G предсказуемо увеличиваются (поведение зависимостей для $\rho \gtrsim 1000''$ статистически незначимо). При этом медианное значение $\Delta Age/Age$ остается практически неизменным.

На рис. 5 поведение зависимости медианных значений ΔRV_c, Δ[Fe/H], $\Delta Age/Age$, ΔA_G от проекции физического расстояния между компонентами показывает картину, качественно сходную с рис. 3. Медианная разность значений значимо растет с увеличением расстояния между компонентами для лучевых скоростей и металличностей (левая верхняя и нижняя панели соответственно), указывая на увеличение доли нефизичных пар; при этом медианная разность ΔA_G (правая нижняя панель) растет слабо, а $\Delta Age/Age$ примерно постоянна.

Таким образом, распределения разностей астрофизических параметров компонентов в зависимости от R_chance_align, ρ и S_p указывают на лучшее согласие характеристик компонентов для металличностей, заметное, но слабое согласие для A_G, и почти отсутствующее согласие для возрастов.

Низкую, в целом, точность оценок возрастов компонентов можно связать с тем, что для звезд главной последовательности наблюдательные характеристики с учетом их ошибок очень слабо зависят от возраста. При этом для подвыборки, включающей в себя 400 надежных пар с компонентами, в которых оба компонента на диаграмме Герцшпрун-

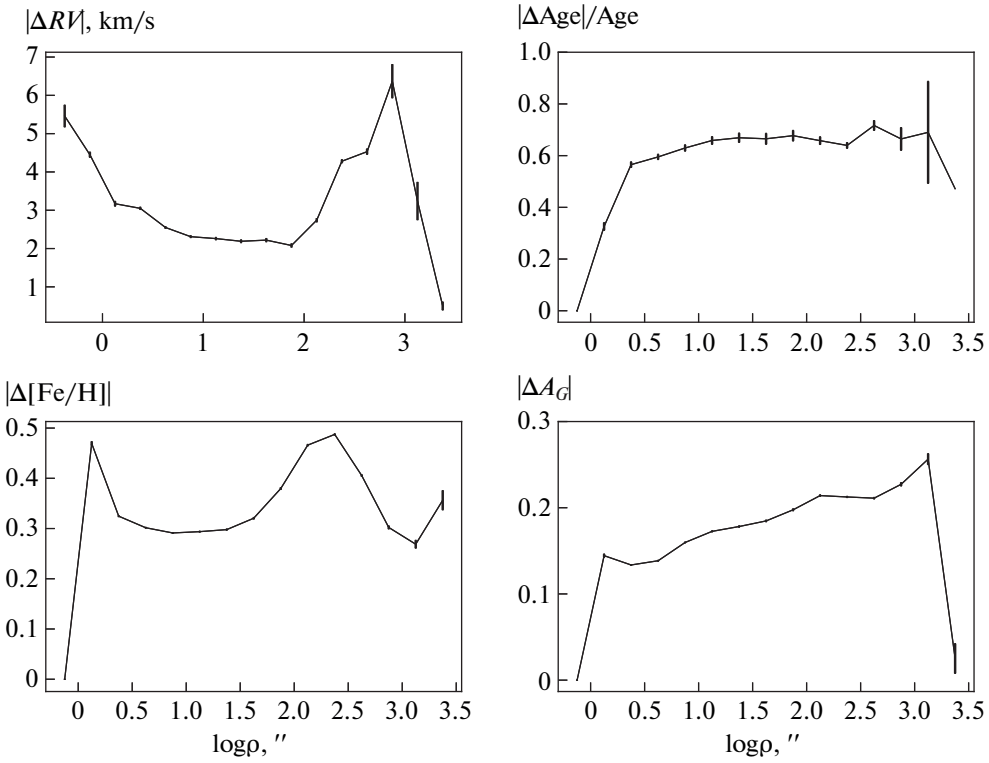

Рис. 4. Связь медианного модуля разности значений характеристик, независимо определенных для компонентов пары, и логарифма углового расстояния между компонентами (в секундах дуги). Слева: разность приведенных лучевых скоростей компонентов (вверху) и разность металличностей (внизу). Справа: разность возрастов в долях возраста главного компонента (вверху) и разность поглощения в полосе G (внизу). Вертикальными барами обозначена величина статистической ошибки.

га–Ресселла выглядят проэволюционировавшими, медианное значение $\Delta Age/Age = 0.25$, при медианном значении для всего ансамбля надежных пар $\Delta Age/Age = 0.61$. Можно ожидать, таким образом, что для звезд, уходящих с главной последовательности, и для звезд-гигантов оценки возрастов в Gaia DR3 более надежны.

3.2. Исследование пространственной полноты каталога

Исходя из метода создания каталога [1] (исключение из рассмотрения областей рассеянных звездных скоплений) и обсуждения рис. 1 в разделе 2 можно ожидать, что каталог широких двойных не обладает пространственной полнотой в объеме 1 кпк. Исследуем связь его пространственной неполноты с характеристиками двойных звезд, модифицировав метод, описанный в работе [24] для изучения зависимости пространственной полноты ансамбля звездных скоплений от их интегральной звездной величины.

При условии равномерного заполнения пространства вокруг Солнца двойными звездами асимптотой распределения, описывающего увеличение их количества N с расстоянием до пары D (в логарифмической шкале), должна быть прямая $f(x) \propto 3x$. Однако исследуемый каталог содержит звезды на расстоянии до 1 кпк, что заметно больше шкалы высоты звездного диска. Мы моделируем ожидаемое распределение звезд, распределяя их в галактических прямоугольных координатах (X,Y) равномерно, а по координате Z – в соответствии с законом $\sec^2$ со шкалой высоты 150 пк, характерной для G-карликов [25]. Нормировка распределения такова, чтобы на расстоянии 1 кпк от Солнца находился 1 млн. звезд, что приблизительно совпадает с числом надежных пар в каталоге. На рис. 6, 7 модельное распределение показано бледно-серой широкой линией. Распределение всех надежных ($R_chance_align < 0.1$) пар каталога показано большими черными кружками (левая панель рис. 6, обе панели рис. 7). В качестве оценки расстояния до пары во всех случаях используется вероятное геометрическое расстояние r_{geo} до главного компонента [22].

На рис. 6 показана зависимость пространственной полноты каталога от абсолютной звезд-

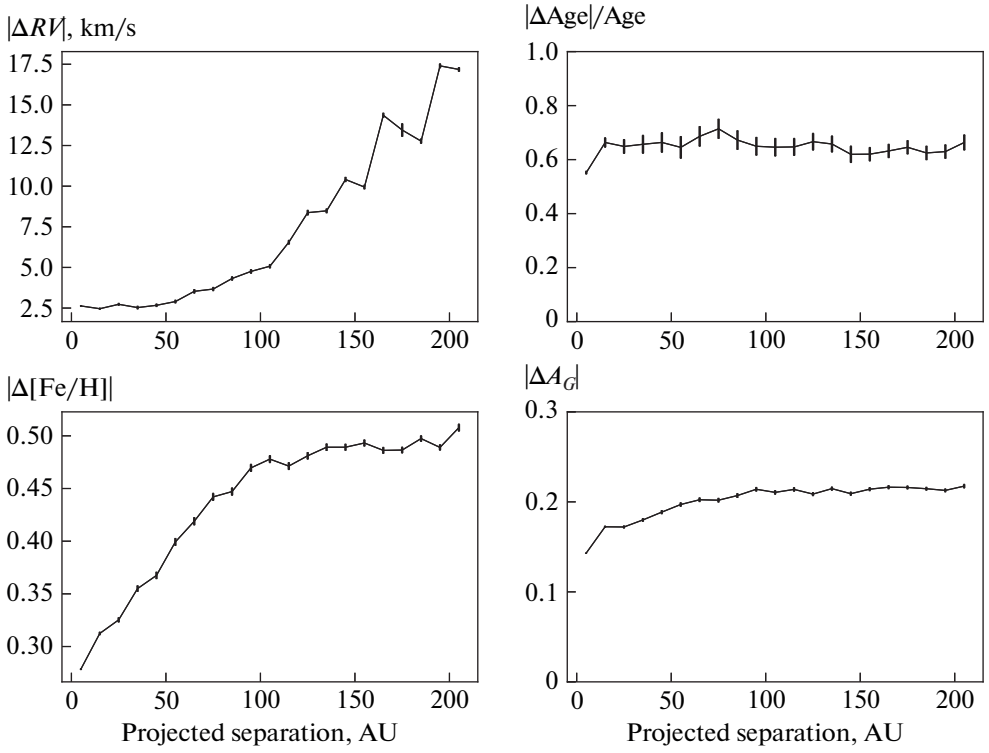

Рис. 5. Связь медианного модуля разности значений характеристик, независимо определенных для компонентов пары, и проекции расстояния между компонентами на тангенциальную плоскость. Слева: разность приведенных лучевых скоростей компонентов (вверху) и разность металличностей (внизу). Справа: разность возрастов в долях возраста главного компонента (вверху) и разность поглощения в полосе G (внизу). Вертикальными барами обозначена величина статистической ошибки.

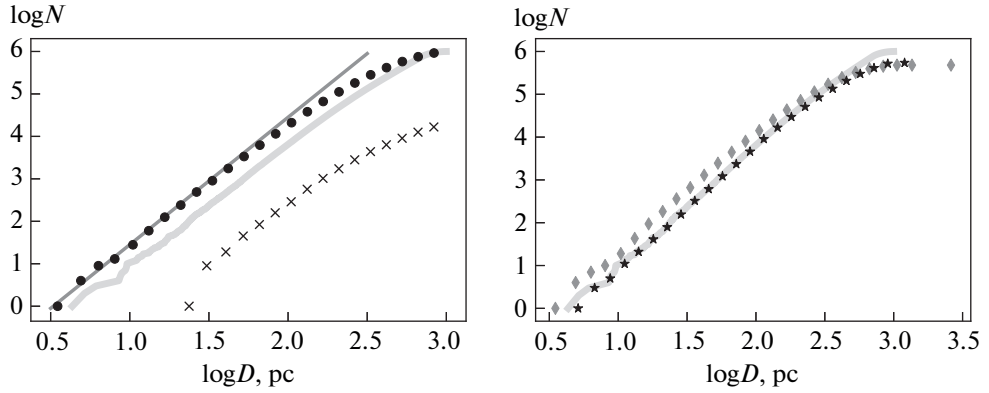

Рис. 6. Число звезд (главных компонентов пар) как функция расстояния от Солнца. Слева: черные кружки – все надежные пары, черные косые крестики – пары с абсолютно ярким главным компонентом ($G_{\rm abs} < 2^m$). Светло-серая линия – модельное распределение (см. текст), темно-серая прямая – функция $f(x) \propto 3x$, для сравнения. Справа: черные звездочки – пары с абсолютной звездной величиной главного компонента $G_{\rm abs} < 7^m$, серые ромбы – пары с абсолютной звездной величиной главного компонента $G_{\rm abs} \geq 7^m$, светло-серая линия – модельное распределение.

ной величины главного компонента. На левой панели представлено распределение всех звезд в сравнении с модельным распределением и, для опоры, асимптотой $f(x) \propto 3x$ (серая тонкая прямая). Косыми крестиками показано изменение с расстоянием количества звезд с абсолютной

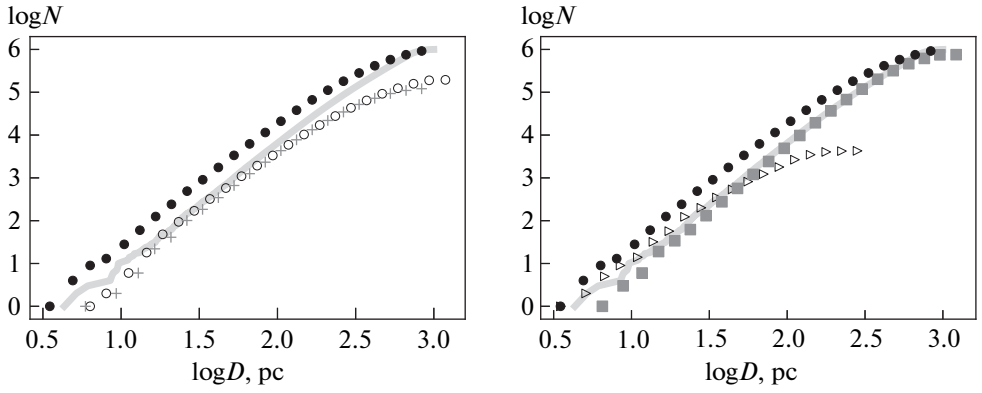

Рис. 7. Число звезд (главных компонентов пар) как функция расстояния от Солнца. Слева: черные кружки – все надежные пары, серые крестики – пары с разностью блеска компонентов $\Delta G > 5^m$, черные пустые кружки – пары с разностью блеска компонентов $\Delta G < 0.5^m$. Светло-серая линия – модельное распределение (см. текст). Справа: все пары и модельное распределение как на левой панели. Серые квадраты – пары с расстоянием между компонентами (проекция) $a_{\rm proj} > 1000$ а.е., черные пустые треугольники – с расстоянием между компонентами $a_{\rm proj} < 100$ а.е.

звездной величиной $G < 2^m$. Это распределение ожидаемо неполно вблизи Солнца (из-за нижнего предела звездной величины Gaia). Сравнение полного распределения надежных пар каталога с модельным (разница около 0.4 dex вблизи Солнца) позволяет оценить вероятный дефицит звезд каталога. В случае его пространственной полноты ожидаемое количество пар в объеме 1 кпк должно было бы составлять около 2.5 млн. Каталог становится неполон в области $D > 200$ пк от Солнца, что совпадает с собственной оценкой его авторов, выполненной другим методом.

На правой панели сопоставлены распределения для звезд с абсолютной звездной величиной $G_{\rm abs} < 7^m$ и $G_{\rm abs} > 7^m$. Для звезд главной последовательности $G_{\rm abs} \approx 7^m$ соответствует спектральному классу K6[1] [26]. Более абсолютно яркая часть ансамбля (черные точки) сохраняет постоянную пространственную плотность до 400 пк, тогда как пространственная плотность более абсолютно слабых пар начинает уменьшаться, начиная примерно с 50 пк от Солнца.

Рисунок 7 демонстрирует влияние характеристик пары на изменение пространственной плотности пар с расстоянием. На левой панели продемонстрировано, что зависимость от разности звездных величин компонентов практически отсутствует: изменение количества звезд с высоким контрастом (серые крестики) и с почти одинаковыми компонентами (черные точки) с расстоянием почти идентично. В ближайшей окрестности Солнца небольшой дефицит пар с разностью блеска между компонентами $\Delta G > 5^m$ может быть связано с неполной представленностью в каталоге Gaia ярких звезд, а на расстояниях около 1 кпк – тем, что вторичные компоненты таких пар становятся слишком слабыми.

На правой панели рис. 7 серыми и черными точками показана зависимость изменения с расстоянием от Солнца пространственной плотности пар в зависимости от расстояния между компонентами. Во всех случаях в качестве расстояния используется его проекция на тангенциальную плоскость. Серыми точками обозначено распределение в пространстве пар с $a_{\rm proj} > 1000$ а.е., а черными точками – пар с расстоянием между компонентами $a_{\rm proj} < 100$ а.е. Относительный недостаток “тесных” двойных с $a_{\rm proj} < 100$ а.е. начинает наблюдаться от примерно 25 пк от Солнца из-за того, что часть пар с высоким контрастом перестает разрешаться в каталоге Gaia, а дальше 125 пк их почти нет. По мере удаления от Солнца в ансамбле начинают доминировать самые широкие пары.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное сравнение независимо определенных характеристик компонентов позволяет оценить величину ошибок этих величин, аналогично тому, как это было сделано в работе [1] для ошибок параллаксов. Мы проделали такие оценки для ошибок лучевых скоростей и металличностей звезд из Gaia DR3.

[1] https://www.pas.rochester.edu/emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt

Таблица 1. Медианные ошибки лучевых скоростей в зависимости от звездной величины, в км/с

G, mag	σ_{RV}(DR3)	σ_{RV}(bin)	σ_{RV}(orb)	σ_{RV}(exp)
<10	0.33	1.6	1.2	1.1
−12	0.86	1.7	0.90	1.5
−13	1.9	3.0	0.81	2.9
−14	3.2	4.8	0.76	4.7
−15	5.5	10.5	0.70	10.5
−16	6.7	20.1	0.67	20.1

Примечание. Приведены для разных диапазонов звездной величины G медианные ошибки: лучевой скорости из Gaia DR3 σ_{RV}(DR3), среднеквадратичное отклонение нормализованной разности лучевых скоростей компонентов пары σ_{RV}(bin), медианная оценка возможной разности лучевых скоростей пары, связанной с орбитальным движением в двойной системе σ_{RV}(orb), и наша результирующая оценка ожидаемой характерной ошибки определения лучевой скорости σ_{RV}(exp).

Рассмотрим наблюдаемое для надежных пар каталога распределение отклонений $\Delta RV/\sigma_{\Delta RV}$, где

$$\Delta RV = RV_1 - RV_2,$$
$$\sigma_{\Delta RV} = \sqrt{\sigma^2_{RV_1} + \sigma^2_{RV_2}}.$$

Если значения лучевых скоростей компонентов идентичны и ошибки лучевых скоростей σ_{RV_1}, σ_{RV_2} реалистичны, то распределение $\Delta RV/\sigma_{\Delta RV}$ будет несмещенным нормальным распределением с дисперсией, близкой к $\sigma^2 = 1$.

На рис. 8 приведены распределения нормализованной на ошибку разности лучевых скоростей компонентов пары в разных диапазонах видимой звездной величины G. Пара включалась в статистику диапазона только если звездные величины обоих компонентов принадлежали соответствующему диапазону. Над каждой панелью указаны результирующие среднеквадратичные отклонения аппроксимирующих распределения гауссиан. Их значения варьируются от 1.5 до 4.9. При этом характерные номинальные ошибки лучевых скоростей зависят от видимой звездной величины источника.

Кроме того, как обсуждалось в разделе 3, для каждого диапазона звездных величин является ожидаемым различие между лучевыми скоростями компонентов, связанное с наличием орбитального движения в системе. Верхние оценки таких различий приведены на рис. 2.

Мы суммируем полученные результаты в табл. 1, где указываем для разных диапазонов звездной величины G медианную ошибку лучевой скорости из Gaia DR3 σ_{RV}(DR3), среднеквадратичное отклонение нормализованной разности лучевых скоростей компонентов пары σ_{RV}(bin), медианную оценку возможной разности лучевых скоростей пары, связанной с орбитальным движением в двойной системе σ_{RV}(orb), и нашу результирующую оценку ожидаемой характерной ошибки определения лучевой скорости σ_{RV}(exp).

Таблица 2. Медианные ошибки металличностей [Fe/H] в зависимости от звездной величины

G, mag	$\sigma_{[Fe/H]}$(DR3)	$\sigma_{[Fe/H]}$(exp)
<10	0.014	0.35
−12	0.013	0.25
−13	0.014	0.17
−14	0.017	0.27
−15	0.022	0.24
−16	0.029	0.28
−17	0.041	0.36
−18	0.056	0.39

Примечание. Приведены медианные значения $\sigma_{[Fe/H]}$(DR3) из Gaia DR3 и полученные оценки ожидаемых значений ошибки [Fe/H] $\sigma_{[Fe/H]}$(exp) (без учета асимметрии).

Аналогичное исследование было проведено для оценок металличностей [Fe/H], в предположении идентичной металличности для компонентов пары звезд. В каталоге Gaia DR3 для астрофизических характеристик, определенных байесовскими методами, указываются нижняя $b_{[Fe/H]}$ и верхняя $B_{[Fe/H]}$ границы диапазона вероятных значений, которые асимметричны относительно наиболее вероятной оценки. Вместо среднеквадратичной ошибки металличности для нормализации наблюдаемого распределения разностей [Fe/H] компонентов Δ[Fe/H]$/\sigma_{\Delta[Fe/H]}$ мы (вообще говоря, не вполне корректно) использовали величину

$$\sigma_{\Delta[Fe/H]} =$$
$$= \sqrt{(0.5(B_{[Fe/H]_1} - b_{[Fe/H]_1}))^2 + (0.5(B_{[Fe/H]_2} - b_{[Fe/H]_2}))^2}.$$

Распределения нормированных отклонений металличности показаны на рис. 9. Обнаружено, что указанные диапазоны значений металличности в каталоге, по-видимому, занижены на порядок. Медианные значения $\sigma_{[Fe/H]}$(DR3) из Gaia DR3 и полученные оценки ожидаемых значений ошибки [Fe/H] $\sigma_{[Fe/H]}$(exp) (без учета асимметрии) приведены в табл. 2.

Отметим также, что исследование статистического согласия характеристик компонентов надежных пар (с R_chance_align < 0.1) было прове-

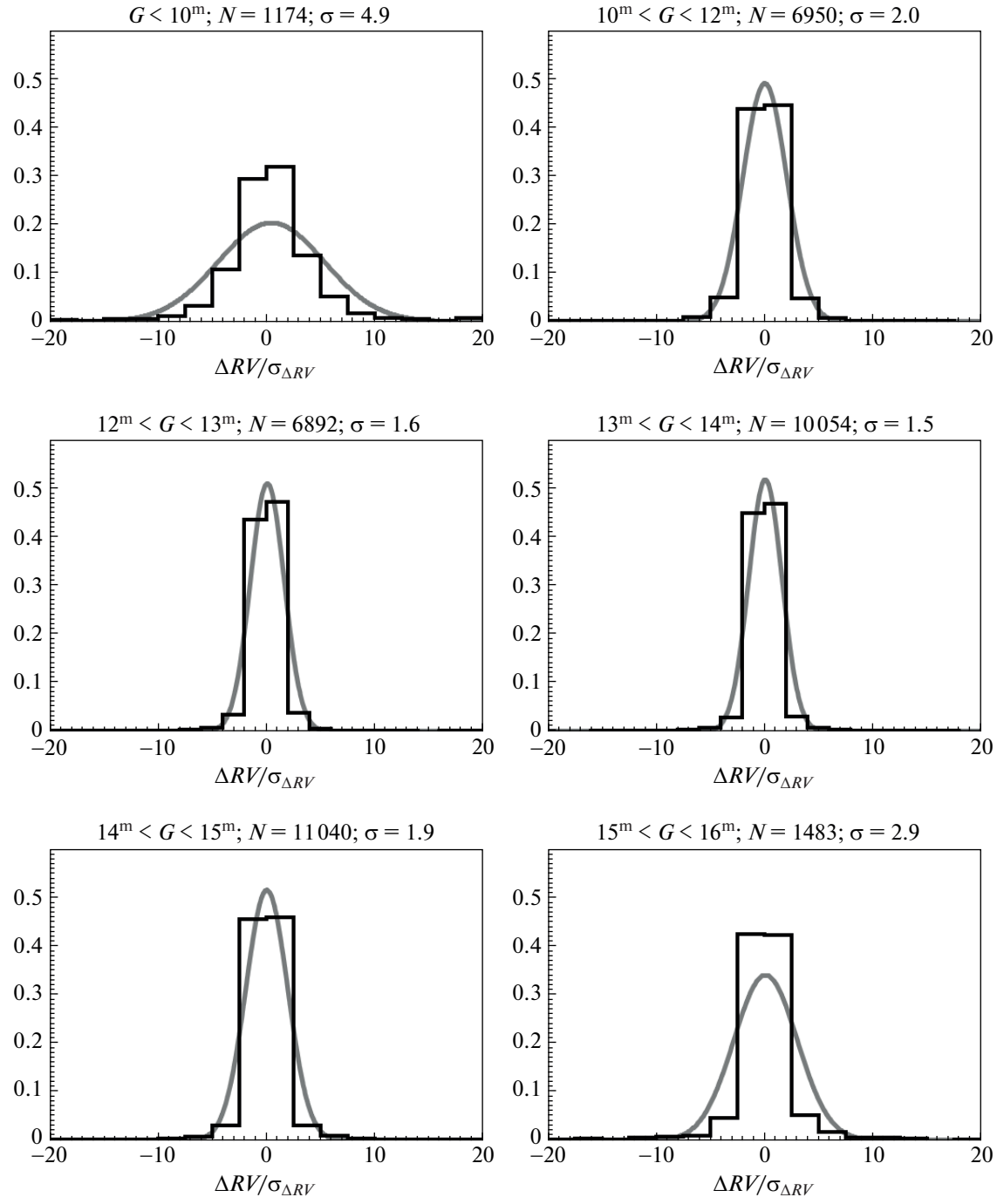

Рис. 8. Распределение разности лучевых скоростей компонентов пары, нормированных на ошибку, для звезд в разных диапазонах видимой звездной величины G. Пара попадает в статистику диапазона в случае, если для обоих компонентов звездная величина находится в указанном диапазоне. Черные гистограммы – наблюдаемые распределения, серые линии – их аппроксимация гауссианами. Над каждой панелью указан диапазон звездных величин, количество пар, принимающих участие в статистике, и среднеквадратичное отклонение, характеризующее аппроксимирующую распределение гауссиану.

дено в оригинальной статье [1] с использованием данных LAMOST [27]. Для лучевых скоростей LAMOST согласие оказалось хорошо соответствующим ошибкам, а ошибки определения металличностей, указанные в каталоге, были признаны заниженными.

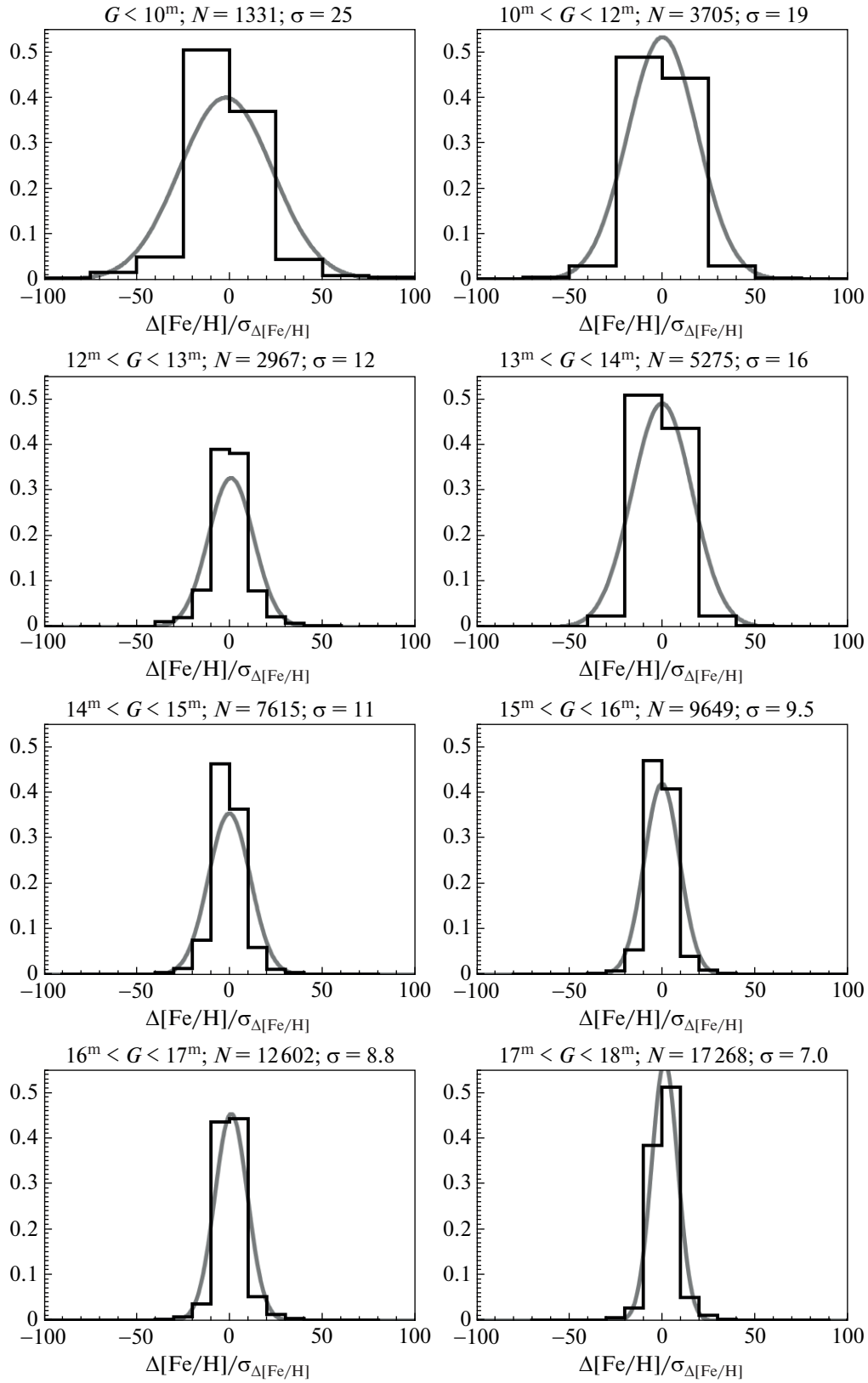

Рис. 9. Распределение разности металличностей компонентов пары, нормированных на ошибку, для звезд в разных диапазонах видимой звездной величины G. Пара попадает в статистику диапазона в случае, если для обоих компонентов звездная величина находится в указанном диапазоне. Черные гистограммы – наблюдаемые распределения, серые линии – их аппроксимация гауссианами. Над каждой панелью указаны диапазон звездных величин, количество пар, принимающих участие в статистике, и среднеквадратичное отклонение, характеризующее аппроксимирующую распределение гауссиану.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проанализирован каталог широких двойных звезд [1], созданный на основании данных Gaia EDR3 и представляющий собой самый обширный список двойных звезд, обладающий высокой степенью однородности и полноты. Этот список представляет перспективный материал для исследования характеристик популяции широких двойных звезд в поле Галактики.

Было показано, что пространственная неоднородность каталога отражает закон сканирования Gaia. Это объясняется тем, что в участках неба, отсканированных наибольшее количество раз, достигаются максимальное проницание и угловое разрешение каталога.

Исследовано изменение пространственной плотности двойных звезд каталога с увеличением расстояния до Солнца. Построено модельное (ожидаемое) распределение, показано путем сравнения с ним наблюдаемого распределения, что в каталоге содержится приблизительно в 2.5 раза меньше двойных звезд, чем ожидалось бы в отсутствие пространственной неполноты (при нормировке модельного распределения на плотность двойных звезд вблизи Солнца). Подтверждено, что радиус пространственной полноты каталога в среднем близок к 200 пк. При этом показано, что радиус пространственной полноты зависит от абсолютной звездной величины главного компонента. Он увеличивается для более абсолютно ярких звезд, но при этом для них увеличивается и внутренний радиус зоны видимости. Пространственная плотность двойных звезд в каталоге почти не зависит от разности звездных величин компонентов, но в ближней к Солнцу и дальней зонах каталог неполон в отношении пар с большой разностью блеска. Пространственная полнота каталога существенно зависит от физического расстояния между компонентами. Неполнота каталога в отношении пар с расстоянием между компонентами меньше 100 а.е. возникает уже на расстоянии 25 пк от Солнца.

Сравнение независимо определенных в рамках каталога Gaia DR3 характеристик компонентов одной и той же пары позволило исследовать, насколько связана вероятность неслучайного объединения компонентов с близостью их характеристик. Для лучевых скоростей было обнаружено, что медианный модуль разности для надежных пар в 5–6 раз меньше такой же величины для случайных пар. Качественное согласие наблюдается также для оценок металличностей [Fe/H] и, в меньшей степени, для оценок поглощения A_G. Для оценок возрастов звезд в целом по ансамблю, в котором доминируют звезды главной последовательности, согласия не обнаружено, что говорит о большой неопределенности этой величины. При этом медианное согласие оценок возрастов для пар с проэволюционировавшими компонентами намного лучше и составляет около 25%.

С использованием параметров компонентов пар из Gaia DR3 выполнена независимая оценка неопределенностей значений лучевых скоростей и металличностей в зависимости от видимой звездной величины G источников. При сравнении лучевых скоростей компонентов учтено их вероятное различие, связанное с наличием орбитального движения в двойной системе. Сделаны оценки ожидаемого различия в зависимости от расстояния до системы и от видимой звездной величины главного компонента. Предложены оценки вероятных медианных значений ошибок лучевых скоростей и металличностей источников Gaia DR3. В зависимости от видимой звездной величины они превышают медианные значения ошибок, приведенных в каталоге: для лучевых скоростей в 1.5–3 раза, для металличностей [Fe/H] в 7–25 раз.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные космической миссии Европейского космического агентства (ESA) Gaia[2], обработанные консорциумом по обработке данных Gaia – Data Processing and Analysis Consortium (DPAC)[3]. Использован интерактивный графический визуализатор и анализатор для табличных данных TOPCAT [28].

Автор выражает благодарность анонимному рецензенту за стимулирующие замечания и рекомендации, позволившие улучшить работу.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *K. El-Badry, H.-W. Rix, and T. M. Heintz*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **506**(2), 2269 (2021).
2. *G. Duchêne and A. Kraus*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **51**(1), 269 (2013), arXiv:1303.3028 [astro-ph.SR].
3. *M. Marks and P. Kroupa*, Astron. and Astrophys. **543**, id. A8 (2012), arXiv:1205.1508 [astro-ph.GA].
4. *M. R. Bate*, *Living Together: Planets, Host Stars and Binaries*, edited by *S. M. Rucinski, G. Torres, and M. Zejda*, ASP Conf. Ser. **496**, 37 (2015).
5. *Tokovinin and O. Kiyaeva*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **456**(2), 2070 (2016), arXiv:1512.00278 [astro-ph.SR].
6. *M. Moe and D. S. Rosanne*, Astrophys. J. Suppl. **230**(2), id. 15 (2017), arXiv:1606.05347 [astro-ph.SR].
7. *E. I. Popova, A. V. Tutukov, and L. R. Yungelson*, Astrophys. Space Sci. **88**(1), 55 (1982).

[2] https://www.cosmos.esa.int/gaia
[3] https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium

8. *S. Vereshchagin, A. Tutukov, L. Iungelson, Z. Kraicheva, and E. Popova*, Astrophys. Space Sci. **142**(1–2), 245 (1988).
9. *M. Marks, P. Kroupa, and J. Dabringhausen*, Astron. and Astrophys. **659**, id. 98 (2022).
10. *M. Rozner and H. B. Perets*, arXiv:2304.02029 [astro-ph.GA] (2023).
11. *T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al.*, Astron. and Astrophys. **595**, id. A1 (2016), arXiv:1609.04153 [astro-ph.IM].
12. *K. El-Badry, H.-W. Rix, H. Tian, G. Duchêne, and M. Moe*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **489**(4), 5822 (2019), arXiv:1906.10128 [astro-ph.SR].
13. *S. A. Sapozhnikov, D. A. Kovaleva, O. Yu. Malkov, and A. Yu. Sytov*, Astron. Rep. **64**(9), 756 (2020), arXiv:2012.06115 [astro-ph.SR].
14. *A. A. Tokovinin*, Astron. and Astrophys. **360**, 997 (2000).
15. *A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, Astron. and Astrophys. **649**, id. A1 (2021), arXiv:2012.01533 [astro-ph.GA].
16. *D. Pourbaix, F. Arenou, P. Gavras, É. Gosset, et al.*, Gaia DR3 documentation, European Space Agency; Gaia Data Processing and Analysis Consortium, id. 7 (2022).
17. *D. Kovaleva, O. Malkov, S. Sapozhnikov, D. Chulkov, and N. Skvortsov*, Comm. Computer and Inform. Sci. **1427**, 125 (2021).
18. *D. Chulkov and O. Malkov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **517**(2), 2925 (2022), arXiv:2206.00604 [astro-ph.SR].
19. *D. Katz, P. Sartoretti, A. Guerrier, P. Panuzzo, et al.*, arXiv:2206.05902 [astro-ph.GA] (2022).
20. *O. L. Creevey, R. Sordo, F. Pailler, Y. Fremat, et al.*, arXiv:2206.05864 [astro-ph.GA] (2022).
21. *M. Foley, A. Goodman, C. Zucker, S. Bialy, et al.*, AAS Meeting Abstracts **54**, id. 333.03 (2022).
22. *C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, and R. Andrae*, Astron. J. **161**(3), 147 (2021), arXiv:2012.05220 [astro-ph.SR].
23. *W. I. Hartkopf, B. D. Mason, and C. E. Worley*, Astron. J. **122**(6), 3472 (2001).
24. *N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz*, Astron. and Astrophys. **585**, id. A101 (2016).
25. *J. Bovy*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **470**(2), 1360 (2017), arXiv:1704.05063 [astro-ph.GA].
26. *M. J. Pecaut and E. E. Mamajek*, Astrophys. J. Suppl. **208**(1), id. 9 (2013), arXiv:1307.2657 [astro-ph.SR].
27. *X.-Q. Cui, Y.-H. Zhao, Y.-Q. Chu, G.-P. Li, et al.*, Res. Astron. and Astrophys. **12**(9), 1197 (2012).
28. *M. B. Taylor*, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*, edited by P. Shopbell, M. Britton, and R. Ebert, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser. **347**, 29 (2005).

CALIBRATING GAIA DR3 UNCERTAINTIES BASED ON DATA FOR WIDE BINARY STARS OF THE FIELD OF GALAXY

D. A. Kovaleva[a]

[a] *Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

We use the catalog of wide binary stars [1], created on the basis of Gaia EDR3 and including more than a million pairs, to analyze Gaia DR3 data independently obtained for the components of the pairs. It is shown that the spatial heterogeneity of the catalog reflects the Gaia scanning law. The change in the spatial density of binary stars of the catalog with increasing distance from the Sun is investigated. By comparison with the model distribution, it is shown that the catalog contains approximately 2.5 times fewer binary stars than would be expected without spatial incompleteness. It is confirmed that the radius of spatial completeness of the catalog is on average close to 200 pc and depends on the absolute magnitude of the main component. The spatial density of binary stars in the catalog mildly depends on the difference in the stellar magnitudes of the components, and significantly depends on the physical distance between the components. The incompleteness of the catalog in relation to pairs with a distance between components less than 100 AU occurs already at a distance of 25 pc from the Sun. A comparison of the characteristics of components of the same pair independently determined within the Gaia DR3 catalog allows us to investigate how the probability of a nonrandom combination of components is related to the proximity of their characteristics. A high degree of correlation of the degree of agreement of the characteristics with the reliability of the pair is found for radial velocities. Qualitative agreement is observed for the metallicity estimates of [Fe/H] and, to a lesser extent, for the absorption estimates of A_G. No agreement was found for the ages of the stars, which indicates their significant uncertainty in the dataset consisting mainly of main sequence stars. At the same time, age estimates for pairs with evolved components show noticeably better agreement than for the dataset as a whole. Using the parameters of the components of pairs from Gaia DR3, an independent estimation of the uncertainties of the values of radial velocities and metallicities depending on the apparent magnitude G of the sources was performed. Estimates of probable median values of radial velocity errors and metallicity of Gaia DR3 sources are proposed. Depending on the apparent magnitude, they exceed the median values of errors given in the catalog: for radial velocities by 1.5–3 times, for metallicity [Fe/H] by 7–25 times. The paper is based on a talk presented at the astrophysical memorial seminar “Novelties in Understanding the Evolution of Binary Stars”, dedicated to the 90th anniversary of Professor M.A. Svechnikov.

Keywords: binary stars, space missions: Gaia