

НОВЫЕ ДЕТАЛИ ЭФФЕКТА ПАРЕНАГО ПО ДАННЫМ ПЕРВОГО РЕЛИЗА ПРОЕКТА Gaia DR1

© 2018 г. В. В. Витязев*, А. В. Попов**, А. С. Цветков***,
С. Д. Петров****, Д. А. Трофимов*****, В. И. Кияев*****

Санкт-Петербургский государственный университет

Поступила в редакцию 01.04.2018 г.

Проведен анализ поля скоростей звезд главной последовательности и красных гигантов каталога TGAS с гелиоцентрическими расстояниями до 1.5 кпк для разных спектральных классов. Чтобы оценить влияние низкой точности измерения параллаксов звезд на результаты кинематического анализа далеких звезд, вначале было детально изучено, как смещаются кинематические параметры, полученные с расстояниями $1/\pi$, при замене этих расстояний тремя другими вариантами расстояний, приведенными в работе Астрадамья и др. (2016b). Получены детальные таблицы, в которых для звезд каждого спектрального класса показаны диапазоны указанных смещений параметров моделей Огородникова–Милна и Боттлингера. Наименьшие смещения мы имеем в случае определения коэффициентов Оорта А и В, для которых смещения на уровне 10% имеют место лишь для звезд главной последовательности спектрального класса В. В остальных случаях эти смещения находятся на уровне 0–3%. Для остальных параметров смещения не превосходят 30%. Тем самым показано, что использование шкалы расстояний $1/\pi$ при получении оценок параметров моделей Огородникова–Милна и Боттлингера (кроме параметра Ω'_0) дает надежные результаты даже при использовании параллаксов с большими относительными ошибками (до 60%). С целью изучения эффекта Паренаго исследована зависимость параметров моделей Огородникова–Милна и Боттлингера от показателя цвета для 1 260 071 звезды главной последовательности и 534 387 красных гигантов. Насколько нам известно, такой массив данных для исследования эффекта Паренаго используется впервые. Главным результатом является обнаружение точек максимумов при $B - V = 0.75$, после которых, при движении от голубых звезд к красным, происходит уменьшение значений компонента скорости Солнца V и коэффициента Оорта В. Этот факт является новой чертой эффекта Паренаго, так как в классическом случае при $B - V > 0.6$ значение компонента V не изменяется. Произведена попытка представить хорошо известный эффект Паренаго как частный случай более сложного эффекта плавного изменения ряда кинематических параметров при изменении среднего возраста и состава изучаемой группы звезд.

Ключевые слова: собственные движения, Gaia DR1, TGAS, кинематика Галактики, эффект Паренаго.

DOI: 10.1134/S032001081810008X

ВВЕДЕНИЕ

Зависимость кинематических параметров от показателя цвета была обнаружена П.П. Паренаго в 1939 г. (Паренаго, 1950) и получила название эффекта Паренаго (Parzenago's discontinuity в англоязычной литературе). Так принято называть зависимость скорости Солнца, координат апекса и параметров эллипсоида скоростей от спектрального класса. Данный эффект был неоднократно

описан или упомянут в работах разных авторов. Наиболее ярко эффект проявляется на компоненте солнечного движения V . В работе (Денен, Бинни, 1998) данный эффект описан следующим образом: для звезд спектральных классов от В до F компонент V медленно растет, а при переходе от спектрального класса F к классу G и далее для более поздних спектральных классов практически не меняется (см. рис. 3 и 4 в работе Денена и Бинни, 1998). Денен и Бинни на основе анализа выборки из 11 865 звезд главной последовательности каталога Hipparcos показали, что $B - V = 0.61$ — это точка “перелома” (точка, в которой положительный градиент становится нулевым), что соответствует спектральному классу G1 (Михалас, Бинни, 1981).

* Электронный адрес: vityazev@list.ru

** Электронный адрес: 9141866@gmail.com

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

**** Электронный адрес: petr0v@mail.ru

***** Электронный адрес: dm.trofimov@gmail.com

***** Электронный адрес: kiyayev@mail.ru

Дробитько и Витязев (2003), проанализировав кинематику 29 197 звезд главной последовательности и 17 465 красных гигантов, подтвердили существование указанного “перелома” при $B - V = 0.6 - 0.7$. При этом для красных гигантов эффект Паренаго не был обнаружен. Кроме того, используя трехмерный вариант диаграммы Герцшпрунга–Рассела ($B - V, M_V, r$), авторы наглядно показали, что точка $B - V = 0.5$ разделяет звезды на две группы. Звезды с $B - V > 0.5$ — это близкие звезды, в большинстве своем расположенные ближе 100 пк от Солнца, в то время как звезды с $B - V < 0.5$ — это звезды, расположенные далее 100 пк. При этом красные гиганты в основном расположены в интервале 100–300 пк. Таким образом, эффект Паренаго проявляется при переходе от звезд, расположенных ближе 100 пк от Солнца, к более далеким звездам.

Бобылев и Байкова (2007), анализируя поле скоростей F- и G- карликов, показали наличие зависимости компоненты солнечного движения U от дисперсии остаточных скоростей и от возраста звезд, а также и то, что кинематика звезд, относящихся к тонкому и к толстому Галактическому диску, существенно различна. При этом кинематические параметры для различных компонент галактического диска также показывают зависимость от возраста, но уже без ярко выраженных скачков.

В работе Хай–Джун Тиан и др. (2015) также обнаружен эффект Паренаго при анализе лучевых скоростей 200 000 FGK-звезд каталога LAMOST DR1. Исследуя зависимость скорости — температура, они обнаружили “скачок” параметра V и выяснили, что “скачок” происходит в районе температуры $T_{\text{eff}} = 6000(5790)$ К, что по данным статьи (Секигучи и др., 2000) соответствует показателю цвета $B - V = 0.61(0.62)$, что, в свою очередь, хорошо согласуется с результатами Денена и Бинни (1998). Кроме того, они обнаружили, что кинематика разных слоев Галактического диска отличается.

Настоящая работа имеет своей целью исследование эффекта Паренаго на основе собственных движений звезд каталога TGAS DR1. В отличие от прежних работ, в которых рассматриваются только параметры Солнечного движения и параметры эллипсоида скоростей в ближайшей окрестности Солнца (до 100 пк), мы поставили задачу изучить также зависимость от показателя цвета параметров кинематических моделей Огородникова–Милна и Боттлингера, определенных для далеких звезд (вплоть до 1.5 кпк). Для того чтобы оценить, как погрешности определения параллакса звезд могут повлиять на результаты определения кинематических параметров, мы, следуя идеологии нашей предыдущей статьи (Витязев и др., 2018), провели кинематический анализ звезд в различных диапазонах показателя цвета $B - V$ для четырех

вариантов гелиоцентрических расстояний, приведенных для звезд каталога TGAS в работе (Астрамадья и др., 2016a,b).

УРАВНЕНИЯ ОГОРОДНИКОВА–МИЛНА

В нашей работе для проведения кинематических исследований собственных движений звезд каталога TGAS использовалась модель Огородникова–Милна (Огородников, 1965; Дю Монт, 1977). В рамках этой модели поле скоростей звезд представляется линейным выражением

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

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 Огородникова–Милна содержит 12 параметров:

U, V, W — компоненты вектора скорости поступательного движения Солнца \mathbf{V}_0 относительно звезд;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — компоненты вектора твердотельного вращения $\boldsymbol{\Omega}$;

$M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+$ — параметры тензора \mathbf{M}^+ , описывающие сжатие–растяжение поля скоростей вдоль главных галактических осей;

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

Известно, что параметры модели Огородникова–Милна позволяют оценить целый ряд кинематических и физических характеристик нашей Галактики. Прежде всего через них определяются постоянные Оорта. В предположении о том, что поле скоростей осесимметрично, или $V_R = 0$, где V_R — проекция скорости звезды на радиус-вектор в Галактической цилиндрической системе координат (Миямото и др., 1993), для постоянных Оорта A и B имеем

$$A = M_{12}^+, \quad B = \omega_3. \quad (2)$$

В свою очередь, постоянные Оорта C и K определяются следующим образом:

$$C = \frac{M_{11}^+ - M_{22}^+}{2}, \quad K = \frac{M_{11}^+ + M_{22}^+}{2} - M_{33}^+. \quad (3)$$

Эти постоянные являются линейными комбинациями градиентов параметров поля скоростей звезд. При этом постоянные A и C характеризуют соответственно азимутальные и радиальные

деформации, постоянная B — компоненту твердотельного вращения звезд относительно Галактической системы координат, а K — дивергенцию поля (Торра и др., 2000).

С учетом этих обозначений условные уравнения, определяющие собственные движения звезд в рамках модели Огородникова—Милна, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathcal{K}\mu_l \cos b &= U/r \sin l - V/r \cos l - \\ &- \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + B \cos b - \\ &- M_{13}^+ \sin b \sin l + M_{23}^+ \sin b \cos l + \\ &+ A \cos b \cos 2l - C \cos b \sin 2l, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{K}\mu_b &= U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - \\ &- W/r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - \\ &- \frac{1}{2} A \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + \\ &+ M_{23}^+ \cos 2b \sin l - \\ &- \frac{1}{2} C \sin 2b \cos 2l - \frac{1}{2} K \sin 2b. \end{aligned} \quad (5)$$

Зная компоненты скорости Солнца U, V и W , можно определить скорость Солнца V_\odot относительно центра рассматриваемого множества звезд, а также координаты апекса Солнца L_\odot, B_\odot :

$$V_\odot = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}, \quad (6)$$

$$L_\odot = \arctg \frac{V}{U}, \quad (7)$$

$$B_\odot = \arctg \frac{W}{\sqrt{U^2 + V^2}}. \quad (8)$$

Постоянные Оорта A и B позволяют оценить параметры вращения Галактики в окрестности Солнца. Действительно, обозначая через R_S расстояние от Солнца до центра Галактики, для линейной скорости Солнца относительно центра Галактики имеем

$$V_S = R_S(A - B). \quad (9)$$

С этой скоростью период вращения Галактики составит

$$P = \frac{2\pi R_S}{V_S}. \quad (10)$$

Отметим, что в нашей работе принято значение $R_S = 8.0 \pm 0.2$ кпк (Валли, 2017).

Наклон кривой вращения Галактики или градиент изменения скорости вращения Галактики вдоль радиуса-вектора определяется с помощью выражения (Витязев, Цветков, 2012)

$$\frac{\partial V_S}{\partial R} = -(A + B). \quad (11)$$

ФОРМУЛЫ БОТТЛИНГЕРА

В настоящей статье, помимо линейной трехмерной кинематической модели Огородникова—Милна, мы использовали кинематическую модель, основанную на формулах Боттлингера (Куликовский, 1985). В отличие от первой модели, в ней предполагается, что центры движутся по круговым орбитам вокруг оси симметрии Галактики, причем плоскости орбит параллельны основной плоскости Галактики. В этом случае основные кинематические уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} V_r &= -U \cos l \cos b - V \sin l \cos b - \\ &- W \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + \\ &+ 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0 + Kr \cos^2 b, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{K}\mu_l \cos b &= U/r \sin l - V/r \cos l + \\ &+ \Omega_0 \cos b - \frac{(R - R_0)}{r} (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 + \\ &+ \frac{0.5(R - R_0)^2}{r} (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{K}\mu_b &= U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - \\ &- W/r \cos b - \frac{R_0(R - R_0)}{r} \sin l \sin b \Omega'_0 - \\ &- \frac{0.5R_0(R - R_0)^2}{r} \sin l \sin b \Omega''_0 - K \cos b \sin b. \end{aligned} \quad (14)$$

В этих формулах через Ω_0 обозначена угловая скорость вращения Галактики на расстоянии R_0 , а через Ω'_0 и Ω''_0 — первая и вторая производные угловой скорости, как функции расстояния R от звезды до оси вращения Галактики:

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (15)$$

В дальнейшем для расстояния Солнца от центра Галактики принимается значение $R_0 = 8.0 \pm 0.4$ кпк.

Входящие в эти уравнения параметры связаны с коэффициентами Оорта следующим образом:

$$A = -0.5R_0\Omega'_0, \quad (16)$$

$$B = -\Omega_0 - 0.5R_0\Omega'_0, \quad (17)$$

$$A - B = \Omega_0. \quad (18)$$

Таблица 1. Характеристика выборок звезд главной последовательности

Спектр	O	B	A	F	G	K	M
$B - V$	< -0.3	$-0.3 : 0.0$	$0.0 : 0.3$	$0.3 : 0.58$	$0.58 : 0.85$	$0.85; 1.42$	> 1.42
$B - V$ mean	-0.37	-0.06	0.19	0.46	0.68	0.96	1.49
N	91	9195	189590	601577	425150	33843	625
σ_{π}/π	0.88	0.39	0.36	0.20	0.14	0.06	0.01
R_{pi} , кпк	2.54	1.15	0.98	0.56	0.36	0.15	0.03
MW, кпк	1.48	0.88	0.84	0.53	0.36	0.15	0.03
Exp1, кпк	0.78	0.59	0.59	0.45	0.33	0.14	0.03
Exp2, кпк	1.92	1.12	1.11	0.64	0.40	0.15	0.03

ДАННЫЕ

Измерения на борту аппарата Gaia дают не расстояния до звезд, а их тригонометрические параллаксы. В случае отсутствия ошибок измерений параллакса гелиоцентрические расстояния вычисляются по формуле ($r = 1/\pi$). В дальнейшем шкалу таких расстояний будем обозначать как R_{pi} . Однако из-за всегда имеющихся погрешностей измерений параллакса вычисление расстояний становится сложной задачей, требующей использования априорных предположений о распределении звезд в пространстве, использования фотометрических, спектральных характеристик звезд, их собственных движений и т.п. В литературе описаны различные способы вычисления поправок расстояний системы R_{pi} (Лутц, Келкер, 1973; Смит, Эйххорн, 1996; Арено, 1999; Байлер-Джонс, 2015; Астрадамадя и др., 2016a,b). При этом все авторы сходятся на том, что коррекция не требуется, если относительная ошибка измерения параллакса не превосходит 10–20%. По этой причине в подавляющем большинстве работ используются выборки звезд с малыми относительными ошибками параллакса, и коррекция расстояний не производится (Бови, 2017; Торра и др., 2000). Вследствие этого при кинематическом анализе используются сравнительно близкие звезды (до 300–500 пк).

Практически одновременно с выходом в свет первого релиза проекта Gaia появилась статья Астрадамадя и др. (2016b), в которой для всех звезд каталогов TGAS (независимо от относительной погрешности измерений параллакса) получены три варианта расстояний (Exp1, Exp2 и MW), основанные на различных методах моделирования пространственного распределения звезд. Расстояния Exp1 и Exp2 получены в рамках модели

экспоненциально убывающей с ростом расстояний пространственной плотности звезд. Два варианта этой модели Exp1 и Exp2 соответствуют двум значениям масштабного фактора (scale length) $L = 1350$ пк (для окончательного состава каталога проекта Gaia) и $L = 110$ пк (для каталога TGAS). Вариант расстояний MW получен на основе моделирования распределения звезд в Галактике (Астрадамадя и др., 2016a).

Отметим, что авторы статьи (Астрадамадя и др., 2016b) предупреждают, что их шкалы расстояний следует использовать только для индивидуальных звезд и не использовать при определении средних расстояний до звезд скоплений или для выяснения соответствия между модельными расстояниями и данными каталога TGAS. В нашей статье мы не определяем ни средние расстояния, ни модельные расстояния, а используем различные версии именно индивидуальных расстояний для решения совсем другой задачи — определения параметров поля скоростей звезд. Так что наш подход не противоречит предостережениям авторов упомянутой статьи.

Мы использовали выборки звезд каталога TGAS, отнесенные к диапазонам показателя цвета $B - V$, соответствующим различным спектральным классам (Михалас, Бинни, 1981). Характеристики выборок звезд главной последовательности, сделанных по диаграмме Герцшпрунга–Рессела (Витязев и др., 2018), построенной по шкале расстояний R_{pi} , показаны в табл. 1. Анализ этой таблицы позволяет сделать следующие выводы:

- Самые малочисленные выборки соответствуют спектральным классам O (91 звезда) и M (625 звезд). По этой причине эти выборки в дальнейшем нами не рассматриваются.

- Средние значения относительных ошибок измерения параллаксов, не превышающие величину 0.21, получены для спектральных классов F, G, K.
- Средние значения относительных ошибок измерения параллаксов, превышающие величину 0.21, получены для спектральных классов B, A.
- Средние расстояния для выборок F, G, K имеют малые различия в противовес выборкам B, A.

Характеристики выборок красных гигантов (КГ), сделанных по диаграмме Герцшпрунга–Рессела, построенной по шкале расстояний R_{pi} , показаны в табл. 1. Анализ этой таблицы показывает следующие черты:

- Основная часть красных гигантов содержится в выборках G-, K-спектральных классов.
- Средние значения относительных ошибок измерения параллаксов для всех трех выборок превышают критическое значение 0.2.
- Для G-, K-спектральных классов средние значения относительных ошибок измерения параллаксов находятся в пределах 0.36–0.41, в то время как для M-выборки эта величина равна 0.57.
- По этой причине шкалы расстояний для звезд G-, K-спектральных классов, не сильно различаясь между собой, заметно отличаются от средних расстояний M-выборки.

В своем исследовании мы использовали фотометрию APASS как более точную (Хенден и др., 2015). К сожалению, точность фотометрии APASS невысока для ярких звезд ($m < 10$). Для таких звезд использовалась фотометрия из каталога Hipparcos.

УСТОЙЧИВОСТЬ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТНОСИТЕЛЬНО СМЕНЫ ШКАЛ РАССТОЯНИЙ

Для четырех вариантов гелиоцентрических расстояний до звезд, указанных в предыдущем разделе, мы получили оценки параметров кинематических моделей Огородникова–Милна и Боттлингера. Вычисления проводились по выборкам звезд главной последовательности и красных гигантов (табл. 1 и 2). Естественно, нас интересует вопрос

Таблица 2. Характеристика выборок красных гигантов

Спектр	G	K	M
$B - V$	0.65 : 1.03	1.03 : 1.57	>1.57
$B - V$ mean	0.94	1.24	1.77
N	115 534	350 025	68 828
σ_{π}/π	0.36	0.41	0.59
R_{pi} , кпк	1.00	1.12	1.32
MW, кпк	0.85	0.96	1.11
Exp1, кпк	0.65	0.69	0.69
Exp2, кпк	1.17	1.33	1.64

о том, насколько смещаются оценки значений параметров моделей, полученных с помощью шкалы R_{pi} при переходе к шкалам Exp1, Exp2, MW. Обозначим через a и b нижнюю и верхнюю границу значений параметров, полученных по всем шкалам расстояний, а через x — значение, соответствующее шкале R_{pi} . Исходя из очевидного неравенства $a \leq x \leq b$, вычислим левосторонние и правосторонние возможные относительные смещения параметра x : $\alpha = (x - a)/|x|$ и $\beta = (b - x)/|x|$. Параметры α и β могут считаться показателями устойчивости значений кинематических параметров при замене одной шкалы расстояний другой. Например, если наибольшее из α, β находится на уровне 5%, то параметры будут меняться мало, и их можно считать устойчивыми на уровне пяти процентов. Наоборот, если наибольшее из α, β превышает 50%, то параметры будут изменяться достаточно сильно, т.е., их можно считать сильно зависящими от шкалы расстояний. Заметим также, что сумма $\gamma = \alpha + \beta$ равна отношению длины отрезка $[b - a]$ к величине $|x|$, и, следовательно, тоже является мерой точности (устойчивости) по отношению к сменам шкал расстояний.

Используем эти понятия для анализа наших результатов. Вначале рассмотрим параметры модели Огородникова–Милна, разделив их на три группы: 1) “солнечные члены” U, V, W ; 2) коэффициенты Оорта A, B, C, K ; 3) деформации и вращения в перпендикулярных плоскостях $M_{13}, M_{23}, \Omega_2, \Omega_1$.

Из табл. 3, 4 видно, что наиболее зависимыми от шкал расстояний являются параметры U, V, W для звезд главной последовательности спектральных классов B и A. Здесь их относительные смещения, полученные по шкале R_{pi} , могут достигать 16%. Эти же смещения для спектральных классов F,

Таблица 3. Значения кинематических параметров в шкале R_i для спектральных классов выборок звезд главной последовательности. Модель Огородникова–Милна

	B	A	F	G	K
U	11.9 ± 0.2	9.7 ± 0.1	8.9 ± 0.1	9.1 ± 0.1	8.6 ± 0.2
Интервал	[10.9; 12.4]	[8.9; 10.1]	[8.7; 9.1]	[9.0; 9.2]	[8.6; 8.6]
$\alpha; \beta$	[8.5%; 4.3%]	[8.4%; 4.5%]	[2.2%; 2.3%]	[0.6%; 1.4%]	[0%; 0%]
V	13.7 ± 0.2	12.4 ± 0.1	16.0 ± 0.1	22.5 ± 0.1	20.7 ± 0.2
Интервал	[12.9; 14.2]	[11.8; 12.8]	[15.7; 16.4]	[22.3; 22.8]	[20.7; 20.7]
$\alpha; \beta$	[5.8%; 3.9%]	[5.0%; 3.0%]	[2.3%; 2.4%]	[0.6%; 1.4%]	[0%; 0%]
W	7.4 ± 0.2	6.8 ± 0.1	7.0 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.4 ± 0.2
Интервал	[6.6; 7.8]	[6.2; 7.1]	[6.8; 7.2]	[7.4; 7.5]	[7.4; 7.4]
$\alpha; \beta$	[10.6%; 16.0%]	[8.7%; 5.1%]	[3.1%; 3.1%]	[0%; 1.8%]	[0%; 0%]
A	12.1 ± 0.4	14.1 ± 0.1	16.3 ± 0.2	17.9 ± 0.3	22.1 ± 2.8
Интервал	[11.9; 13.0]	[13.7; 14.1]	[16.1; 16.3]	[17.8; 18.0]	[22.0; 22.1]
$\alpha; \beta$	[1.8%; 7.1%]	[2.9%; 0%]	[1.1%; 0%]	[0.8%; 0.3%]	[0.4%; 0%]
B	-13.4 ± 0.3	-13.1 ± 0.1	-12.5 ± 0.1	-11.9 ± 0.2	-14.5 ± 2.2
Интервал	[-13.8; -12.0]	[-13.2; -12.5]	[-12.6; -12.4]	[-12.0; -11.9]	[-14.5; -14.5]
$\alpha; \beta$	[2.7%; 10.1%]	[1.3%; 4.6%]	[1.0%; 1.3%]	[0.9%; 0%]	[0%; 0%]
C	-2.4 ± 0.4	-4.5 ± 0.1	-3.9 ± 0.2	-4.5 ± 0.3	—
Интервал	[-2.9; -0.5]	[-4.9; -3.2]	[-4.1; -3.4]	[-4.5; -4.4]	—
$\alpha; \beta$	[23.0%; 77.5%]	[9.2%; 27.9%]	[5.7%; 11.1%]	[0%; 1.2%]	—
K	-3.7 ± 1.4	-4.6 ± 0.4	-3.3 ± 0.3	-1.7 ± 0.6	—
Интервал	[-3.7; -3.4]	[-4.7; -4.3]	[-3.3; -3.2]	[-2.1; -1.5]	—
$\alpha; \beta$	[1.2%; 7.0%]	[1.5%; 5.7%]	[0%; 2.2%]	[17.8%; 16.3%]	—
M_{23}	-4.4 ± 0.7	—	1.0 ± 0.2	1.5 ± 0.3	—
Интервал	[-4.8; -4.3]	—	[0.7; 1.1]	[1.4; 1.6]	—
$\alpha; \beta$	[8.6%; 3.7%]	—	[28.8%; 7.8%]	[7.5%; 3.3%]	—
M_{13}	-3.2 ± 0.7	-1.7 ± 0.2	-1.4 ± 0.2	-1.3 ± 0.3	—
Интервал	[-3.5; -3.0]	[-2.0; -1.7]	[-1.5; -1.3]	[-1.4; -1.3]	—
$\alpha; \beta$	[8.6%; 3.7%]	[15.2%; 0%]	[10.1%; 2.0%]	[5.3%; 0%]	—
Ω_1	5.0 ± 0.7	2.0 ± 0.2	2.1 ± 0.1	1.5 ± 0.3	—
Интервал	[4.9; 5.1]	[1.9; 2.1]	[2.1; 2.1]	[1.3; 1.7]	—
$\alpha; \beta$	[0.9%; 3.0%]	[6.7%; 2.6%]	[0%; 0%]	[11.1%; 12.0%]	—
Ω_2	-3.1 ± 0.7	-1.5 ± 0.2	-1.4 ± 0.2	-1.5 ± 0.3	—
Интервал	[-3.6; -3.0]	[-1.7; -1.5]	[-1.5; -1.4]	[-1.6; -1.5]	—
$\alpha; \beta$	[15.0%; 3.7%]	[10.1%; 0%]	[6.1%; 0%]	[-4.9%; 0%]	—

Примечание. Интервалы значений по шкалам $Exp1$, $Exp2$, MW , R_i . $\alpha; \beta$ — левостороннее и правостороннее уклонения оценки параметра в шкале R_i относительно границ интервалов. Прочерки проставлены в тех случаях, когда значения параметров оказались не значимы по правилу “три сигма”. В первой строке указаны спектральные классы выборок звезд главной последовательности.

Таблица 4. Значения кинематических параметров в шкале R_pi для спектральных классов выборок звезд (красных гигантов)

	G	K	M
U	10.0 ± 0.1	8.4 ± 0.1	6.8 ± 0.1
Интервал	[8.8; 10.6]	[6.9; 9.3]	[4.4; 8.8]
α; β	[11.3%; 6.1%]	[18.3%; 10.7%]	[34.8%; 30.3%]
V	24.9 ± 0.1	23.8 ± 0.1	22.9 ± 0.1
Интервал	[21.9; 26.5]	[19.9; 25.5]	[17.1; 26.0]
α; β	[12.1%; 6.3%]	[16.0%; 7.4%]	[25.5%; 13.3%]
W	6.3 ± 0.1	6.6 ± 0.1	5.3 ± 0.1
Интервал	[5.5; 7.6]	[5.2; 7.4]	[3.5; 6.6]
α; β	[16.7%; 9.5%]	[20.9%; 12.1%]	[33.1%; 25.3%]
A	11.7 ± 0.2	13.2 ± 0.1	12.6 ± 0.2
Интервал	[11.4; 11.8]	[13.0; 13.4]	[12.3; 12.6]
α; β	[2.4%; 0.8%]	[1.9%; 1.4%]	[2.2%; 0.4%]
B	-14.2 ± 0.2	-13.1 ± 0.1	-13.5 ± 0.1
Интервал	[-14.5; -14.0]	[-13.3; -12.6]	[-13.8; -12.7]
α; β	[2.1%; 1.4%]	[2.1%; 3.9%]	[2.7%; 5.5%]
C	-2.3 ± 0.2	-3.1 ± 0.1	-2.5 ± 0.2
Интервал	[-2.6; -1.7]	[-3.3; -2.4]	[-2.7; -2.2]
α; β	[14.2%; 25.6%]	[5.4%; 21.7%]	[6.4%; 12.3%]
K	-2.7 ± 0.4	-2.8 ± 0.2	-5.4 ± 0.5
Интервал	[-2.9; -2.5]	[-3.0; -2.7]	[-5.7; -4.8]
α; β	[7.7%; 7.1%]	[4.6%; 4.0%]	[5.1%; 10.9%]
M ₂₃	—	-9.8 ± 0.1	—
Интервал	—	[-0.8; -0.6]	—
α; β	—	[0%; 24.0%]	—
M ₁₃	—	-1.2 ± 0.1	—
Интервал	—	[-1.3; -1.1]	—
α; β	—	[13.2%; 3.0%]	—
Ω ₁	—	—	-2.7 ± 0.3
Интервал	—	—	[-3.0; -2.4]
α; β	—	—	[9.7%; 9.8%]
Ω ₂	—	-1.0 ± 0.1	-0.9 ± 0.3
Интервал	—	[-1.0; -0.9]	[-1.2; -0.7]
α; β	—	[0%; 5.6%]	[32.0%; 23.0%]

Примечание. Интервалы значений по шкалам Exp1, Exp2, MW, R_pi. α; β — левостороннее и правостороннее отклонения оценки параметра в шкале R_pi относительно границ интервалов. Прочерки проставлены в тех случаях, когда значения параметров оказались не значимы по правилу “три сигма”. В первой строке указаны спектральные классы выборок звезд (красные гиганты).

G, K не превосходят 3%, что свидетельствует о слабой зависимости этих параметров от применяемой шкалы расстояний. Это различие между спектральными классами вполне понятно, так как по данным табл. 1 относительные ошибки измерения параллаксов для спектральных классов F, G, K не превышают 0.2. Что касается красных гигантов, то здесь смещения параметров U , V , W находятся в пределах от 6 до 35%, что также соответствует данным табл. 2, из которой следует, что здесь относительные ошибки измерения параллаксов для спектральных классов F, G, K превышают 0.2.

Из табл. 3, 4 видно, что наименее чувствительными к шкалам расстояний являются коэффициенты Оорта A и B при их определении как по звездам главной последовательности, так и по красным гигантам. Действительно, их смещения могут достигать 10% лишь для звезд главной последовательности спектрального класса B. В остальных случаях эти смещения находятся на уровне 0–3% для звезд главной последовательности и 0–6% для красных гигантов.

При определении параметра C наименее благоприятной оказывается выборка звезд главной последовательности спектрального класса B, где смещение может достигать 77.5%, а также выборка спектрального класса K, в котором результат оказывается вообще не значимым. Для красных гигантов наблюдаются смещения до 26% для спектрального класса G. Что касается параметра K, то смещения его значений достигают 18% и 16% только для звезд главной последовательности спектрального класса G. Для остальных звезд эти смещения существенно меньше.

Параметры M_{23} и Ω_1 определяются по звездам главной последовательности и красным гигантам со смещениями до 29%, а параметры M_{13} и Ω_2 — со смещениями до 15%.

Перейдем теперь к рассмотрению параметров модели Боттлингера. По звездам главной последовательности и красным гигантам величина смещений параметров U , V , W получилась практически равной случаю модели Огородникова—Милна.

Практическую независимость от шкалы расстояний показывают параметры Ω_0 и Ω'_0 (величина смещений не превосходит 4.4%). В свою очередь это обстоятельство, в силу формул (16), (17), дает очень надежное определение постоянных Оорта A и B, практически не зависящих от использованной шкалы расстояний. В противоположность этому значения Ω''_0 показывают огромные смещения (более 100%), что говорит о том, что значение этой величины сильно зависит от шкалы расстояний. По данной причине определение оценки этой величины требует дополнительных обоснований выбора той или иной шкалы расстояний.

Резюмируя, можно сказать, что использование шкалы расстояний R_{pi} при получении оценок параметров модели Огородникова—Милна и Боттлингера дает абсолютно неправдоподобные результаты только для значения параметра Ω''_0 в модели Боттлингера. Во всех остальных случаях переход на шкалы Exp1, Exp2, MW вызывает смещения в диапазоне от 0 до 30%. Наиболее благоприятную ситуацию мы имеем в случае определения коэффициентов Оорта A и B, для которых смещения до 10% имеют место лишь для звезд главной последовательности спектрального класса B. В остальных случаях эти смещения находятся на уровне 0–6%. Во всяком случае полученные нами табл. 3–6 дают не только интервалы, содержащие внутри себя значения искомого параметра, но и позволяют выделить кинематические параметры, наиболее надежно определяемые по различным выборкам звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ ЦВЕТА

Опираясь на оптимистические прогнозы точности значений кинематических параметров, получаемых по шкале расстояний R_{pi} , изучим теперь зависимость этих значений от показателя цвета $B - V$ или, что то же самое, от спектрального класса звезд наших выборок. Для этого, используя выборки звезд по $B - V$ с шагом 0.1^m , мы построили графики (рис. 1–4), на которых показаны значения кинематических параметров в зависимости от $B - V$ для всех четырех шкал расстояний. На этих рисунках видна хорошая согласованность систематического хода кривых для всех четырех шкал расстояний. Заметное различие имеется для значений $B - V < 0.3$ (спектральные классы B и A), после чего кривые сходятся для поздних спектральных классов. Этот факт легко интерпретируется, так как по данным табл. 1 точность определения параллаксов для далеких звезд увеличивается при переходе от далеких звезд к близким.

На рис. 1 видно уменьшение значений параметров U , W при $B - V > 1.3$, однако самый разительный эффект демонстрирует компонент V . Действительно, на интервале [0.5; 0.74] параметр V линейно увеличивается, потом достигает максимума 23.3 км/с при $B - V = 0.74$, а затем при $B - V > 0.74$ начинает убывать. После $B - V > 1.2$ наблюдаются колебания вокруг среднего значения 20.2 км/с с амплитудой 1 км/с. Этот факт является достаточно неожиданным, так как в работах Паренаго (1950) и Денена и Бинни, (1998) в диапазоне $0.6 < B - V < 1.2$ мы наблюдаем “плато Паренаго”, где параметр $V = 24$ км/с. График модуля

Таблица 5. Значения кинематических параметров в шкале Rpi для спектральных классов выборок звезд главной последовательности. Модель Боттлингера

	B	A	F	G	K
U	11.8 ± 0.2	9.6 ± 0.1	8.9 ± 0.1	9.1 ± 0.1	8.6 ± 0.2
Интервал	[10.8; 12.3]	[8.8; 10.0]	[8.7; 9.1]	[9.0; 9.2]	[8.6; 8.6]
$\alpha; \beta$	[9.0%; 4.4%]	[8.3%; 4.5%]	[2.2%; 2.3%]	[0.6%; 1.3%]	[0%; 0%]
V	13.3 ± 0.2	12.2 ± 0.1	16.1 ± 0.1	22.6 ± 0.1	20.3 ± 0.2
Интервал	[13.3; 13.8]	[12.1; 12.5]	[16.1; 16.3]	[22.6; 22.7]	[20.3; 20.4]
$\alpha; \beta$	[0%; 3.5%]	[1.0%; 1.8%]	[0%; 1.5%]	[0%; 0.5%]	[0%; 0.2%]
W	7.5 ± 0.1	6.9 ± 0.1	7.1 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.4 ± 0.2
Интервал	[6.7; 7.9]	[6.3; 7.3]	[6.9; 7.3]	[7.3; 7.5]	[7.4; 7.4]
$\alpha; \beta$	[10.6%; 5.5%]	[9.1%; 5.1%]	[3.1%; 3.1%]	[0.7%; 1.8%]	[0%; 0%]
Ω_0	25.1 ± 0.5	27.1 ± 0.1	28.5 ± 0.2	29.7 ± 0.4	36.2 ± 3.5
Интервал	[24.4; 25.3]	[26.0; 27.4]	[28.1; 28.7]	[29.7; 29.7]	[36.1; 36.2]
$\alpha; \beta$	[2.8%; 0.6%]	[4.4%; 1.0%]	[1.3%; 0.6%]	[0%; 0%]	[0.3%; 0.1%]
Ω'_0	-3.2 ± 0.1	-3.6 ± 0.1	-4.1 ± 0.1	-4.4 ± 0.1	-5.4 ± 0.7
Интервал	[-3.2; -3.1]	[-3.6; -3.5]	[-4.1; -4.0]	[-4.5; -4.4]	[-5.4; -5.4]
$\alpha; \beta$	[0%; 4.3%]	[0%; 2.5%]	[0.3%; 0.8%]	[0.6%; 1.0%]	[0%; 0%]
Ω''_0	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.1	1.6 ± 0.1	3.3 ± 0.3	—
Интервал	[0.4; 3.3]	[0; 1.8]	[0.7; 4.8]	[0.9; 6.6]	—
$\alpha; \beta$	[30%; 517%]	[103%; 404%]	[57%; 204%]	[73%; 109%]	—
K	-4.5 ± 1.4	-4.3 ± 0.4	-3.5 ± 0.3	-2.3 ± 0.6	—
Интервал	[-4.6; -4.0]	[-4.4; -4.2]	[-3.5; -3.5]	[-2.5; -2.0]	—
$\alpha; \beta$	[1.7%; 11.9%]	[1.1%; 3.4%]	[0%; 0%]	[11.8%; 11.3%]	—
A	12.8 ± 0.4	14.2 ± 0.1	16.0 ± 0.2	17.8 ± 0.3	21.8 ± 2.8
Интервал	[12.3; 12.8]	[13.8; 14.2]	[16.1; 16.3]	[17.6; 17.9]	[21.7; 21.8]
$\alpha; \beta$	[4.3%; 0%]	[2.5%; 0%]	[0.8%; 0.3%]	[1.0%; 0.6%]	[0.4%; 0.1%]
B	-12.3 ± 0.6	-12.9 ± 0.2	-12.3 ± 0.2	-12.0 ± 0.5	-14.4 ± 4.5
Интервал	[-12.6; -11.8]	[-13.3; -12.1]	[-12.5; -11.9]	[-12.1; -11.9]	[-14.4; -14.4]
$\alpha; \beta$	[1.9%; 3.9%]	[2.8%; 6.4%]	[1.8%; 3.4%]	[1.1%; 0.9%]	[0%; 0%]

Примечание. Интервалы значений по шкалам Exp1, Exp2, MW, Rpi. $\alpha; \beta$ — левостороннее и правостороннее уклонения оценки параметра в шкале Rpi относительно границ интервалов.

скорости Солнца, показанный на рис. 1, отражая отмеченные эффекты в поведении компонентов U, V, W, показывает аналогичную картину в области $B - V > 0.74$. Характерные скачки градиентов изменения координат апекса движения Солнца (рис. 1) четко видны в точке $B - V = 0.74$.

В случае коэффициента Оорта A (рис. 2) отмечается монотонное возрастание вплоть до $B - V = 0.9$. Интересно отметить, что картина, весьма

схожая с поведением компонента V, наблюдается в случае коэффициента Оорта B (рис. 2). На интервале [0.4; 0.75] мы вновь имеем положительный градиент, затем максимум в точке $B - V = 0.75$, затем при $B - V > 0.75$ убывание. Вычисляемые через коэффициенты Оорта A и B, линейная скорость вращения Галактики (рис. 2) и наклон кривой вращения Галактики (рис. 2) показывают сильную зависимость от $B - V$ со скачком изменения гради-

Таблица 6. Значения кинематических параметров в шкале R_{p1} для спектральных классов выборок звезд (красных гигантов). Модель Боттлингера

	G	K	M
U	10.0 ± 0.1	8.9 ± 0.1	7.1 ± 0.1
Интервал	[8.9; 10.6]	[7.0; 7.5]	[4.7; 9.1]
α; β	[11.3%; 6.1%]	[18.4%; 10.8%]	[34.1%; 28.5%]
V	24.1 ± 0.1	22.2 ± 0.1	20.8 ± 0.2
Интервал	[23.0; 25.1]	[20.5; 23.2]	[18.0; 22.80]
α; β	[4.3%; 4.3%]	[7.6%; 4.4%]	[13.5%; 9.6%]
W	6.9 ± 0.1	6.6 ± 0.1	5.5 ± 0.1
Интервал	[5.7; 7.5]	[5.2; 7.3]	[3.7; 6.8]
α; β	[23%; 14%]	[21.1%; 11.8%]	[32.8%; 24.3%]
Ω ₀	25.9 ± 0.3	26.4 ± 0.1	25.9 ± 0.2
Интервал	[25.4; 26.2]	[25.6; 26.7]	[24.8; 26.3]
α; β	[2.2%; 1.2%]	[3.1%; 1.2%]	[4.2%; 1.8%]
Ω' ₀	-2.9 ± 0.1	-3.3 ± 0.1	-3.2 ± 0.1
Интервал	[-3.0; -2.9]	[-3.3; -3.3]	[-3.2; -3.0]
α; β	[1.9%; 1.82%]	[0%; 0%]	[0%; 4.0%]
Ω'' ₀	-0.3 ± 0.1	-0.2 ± 0.1	—
Интервал	[-0.8; 3.2]	[-0.6; 2.1]	—
α; β	[164%; 1112%]	[225%; 1300%]	—
K	-2.6 ± 0.4	-2.6 ± 0.2	-4.1 ± 0.5
Интервал	[-2.8; -2.4]	[-2.8; -2.4]	[-4.4; -3.6]
α; β	[11.3%; 7.5%]	[5.8%; 10.2%]	[5.8%; 13.8%]
A	11.6 ± 0.2	13.4 ± 0.1	12.6 ± 0.2
Интервал	[11.4; 11.9]	[13.1; 13.4]	[12.1; 12.8]
α; β	[1.8%; 1.9%]	[2.2%; 0%]	[4.0%; 1.0%]
B	-14.3 ± 0.4	-13.1 ± 0.2	-13.3 ± 0.3
Интервал	[-14.7; -13.5]	[-13.4; -12.4]	[-13.6; -12.7]
α; β	[3.0%; 5.5%]	[2.9%; 5.3%]	[2.5%; 4.4%]

Примечание. Интервалы значений по шкалам Exp1, Exp2, MW, R_{p1}. α; β — левостороннее и правостороннее уклонения оценки параметра в шкале R_{p1} относительно границ интервалов.

ента в точке $B - V = 0.75$. Остальные коэффициенты Оорта (C, K, рис. 2) также показывают зависимость от $B - V$, причем здесь тоже наблюдаются экстремумы вблизи точек $B - V = 0.65-0.75$. Среди оставшихся параметров модели Огородникова-Милна Ω_x , M_{23}^+ , Ω_y , M_{13}^+ (рис. 3) лишь параметр M_{23}^+ показывает в своей зависимости от показателя цвета некоторое подобие эффекта Паренаго.

На рис. 4 показаны параметры, специфические для модели Боттлингера. Здесь мы видим, что параметр Ω_0 растет практически линейно с ростом $B - V$ на интервале [0.1; 0.4], потом, вплоть до $B - V = 0.65$, рост прекращается, а после $B - V = 0.65$ рост возобновляется. При $B - V = 0.84$ имеет место максимум, после которого значение параметра Ω_0 начинает убывать при движении к красным звездам.

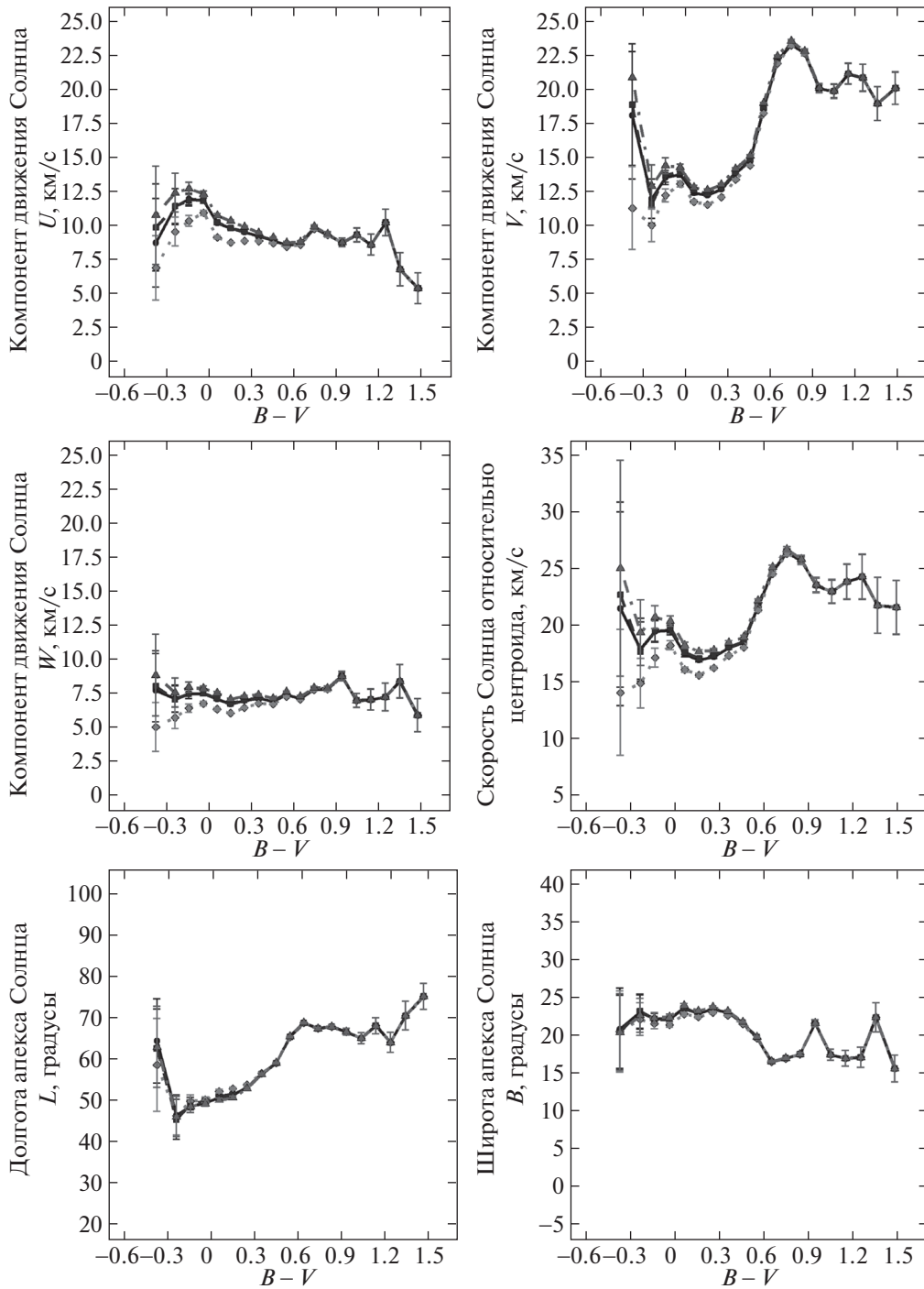


Рис. 1. Зависимость компонент скорости движения Солнца U , V , W и координат апекса Солнца модуля скорости V_0 от показателя цвета $B - V$, определенные для звезд главной последовательности каталога TGAS, в различных вариантах расстояний: точки — Exr1, штрихпунктирная линия — Exr2, штриховая линия — MW, сплошная линия — Pri. Модель Огородникова–Милна.

В свою очередь параметр Ω'_0 ведет себя достаточно спокойно, практически линейно убывая с ростом $B - V$, не показывая никаких деталей в области спектральных классов G и K.

Очень интересным является зависимость параметра Ω''_0 от $B - V$. Выше уже отмечалось, что

оценки этого параметра сильно разнятся для различных шкал расстояний. Несмотря на это, все четыре шкалы расстояний показывают существование максимума в точке $B - V = 0.65$ и резкий спад величины Ω''_0 при движении от точки максимума вправо.

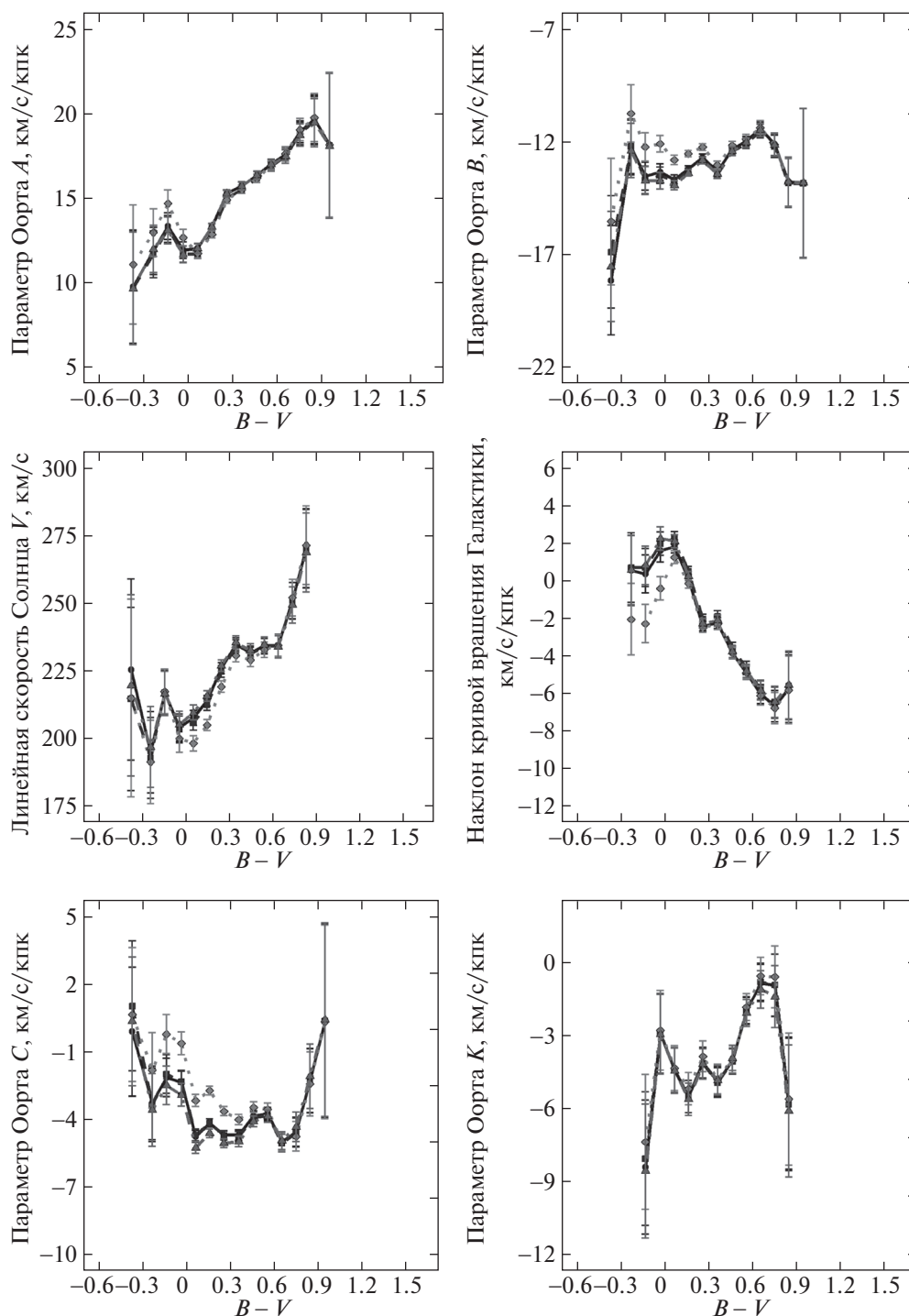


Рис. 2. Зависимость коэффициентов Оорта A , B ; линейной скорости вращения Галактики $V_S = R_S(A - B)$ и наклон кривой вращения Галактики от показателя цвета $B - V$, определенные для звезд главной последовательности каталога TGAS в различных вариантах расстояний: точки — Exp1, штрихпунктирная линия — Exp2, штриховая линия — MW, сплошная линия — Rpi. Модель Огородникова–Милна.

Сформированная нами выборка красных гигантов относится к диапазону $0.9 < B - V < 2.0$, где находится “плато Паренаго”. По этой причине использовать красные гиганты для исследования полного эффекта Паренаго при переходе из спек-

трального класса G в класс K мы не можем. Тем не менее и в зоне “плато Паренаго” некоторые кинематические параметры красных гигантов показывают зависимость от показателя цвета $B - V$.

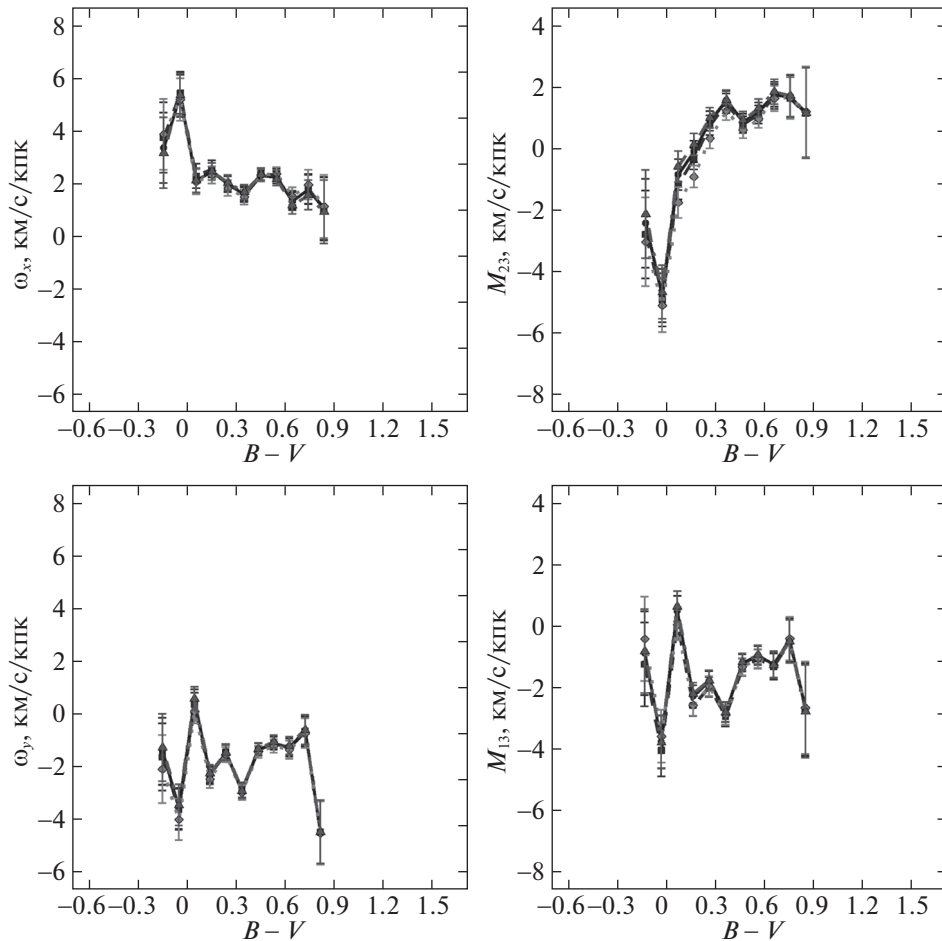


Рис. 3. Зависимость компонентов твердотельного вращения ω_1 , ω_2 , параметры тензора M_{23}^+ , M_{12}^+ , описывающие сжатие–растяжение поля скоростей вдоль главных галактических осей, от показателя цвета $B - V$, определенные для звезд главной последовательности каталога TGAS в различных вариантах расстояний: точки — Exp1, штрихпунктирная линия — Exp2, штриховая линия — MW, сплошная линия — Rpi. Модель Огородникова–Милна.

Изучение этих зависимостей выходит за рамки настоящей статьи.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В нашей работе на основе анализа данных по 1 260 071 звезде главной последовательности мы видим, что зависимость от показателя цвета имеет место не только для компонентов скорости Солнца относительно центроидов, взятых в обработку выборок, но и для других кинематических параметров. Важно отметить, что скачков в изменении значений кинематических параметров мы не наблюдаем. Резко изменяются только градиенты хода параметров по показателю цвета. При этом экстремумы и скачки градиентов приходятся на несколько характерных значений или интервалов по шкале $B - V$. Так, максимумы кривых $V = V(B - V)$ и $B = B(B - V)$ имеют место в точках $B - V = 0.75$.

В свою очередь интервалы положительных градиентов кривых $V = V(B - V)$ и $B = B(B - V)$

равны $0.5 < B - V < 0.75$ и $0.4 < B - V < 0.75$. Отметим также, что для параметров модели Боттлингера имеют место аналогичные результаты. Например, значение нулевого градиента параметра Ω_0'' приходится на интервал $0.4 < B - V < 0.65$, а точка экстремума зависимости Ω_0'' от показателя вновь выпадает на значение $B - V = 0.65$.

Основное отличие наших результатов от классических заключается в том, что точка $B - V = 0.61$ больше не является “точкой разрыва”, после которой параметр V принимает постоянное значение (“плато Паренаго”). В нашем случае точка $B - V = 0.75$ является точкой максимума, после которой при движении к красным карликам компонент V идет на спад, а потом показывают колебания вокруг среднего значения $V = 20.2$ км/с, меньшего чем “плато Паренаго”, где $V = 24$ км/с. Этот факт требует объяснения.

С этой целью рассмотрим рис. 5, взятый из статьи Хай-Джун Тиан и др. (2015), и дополненный

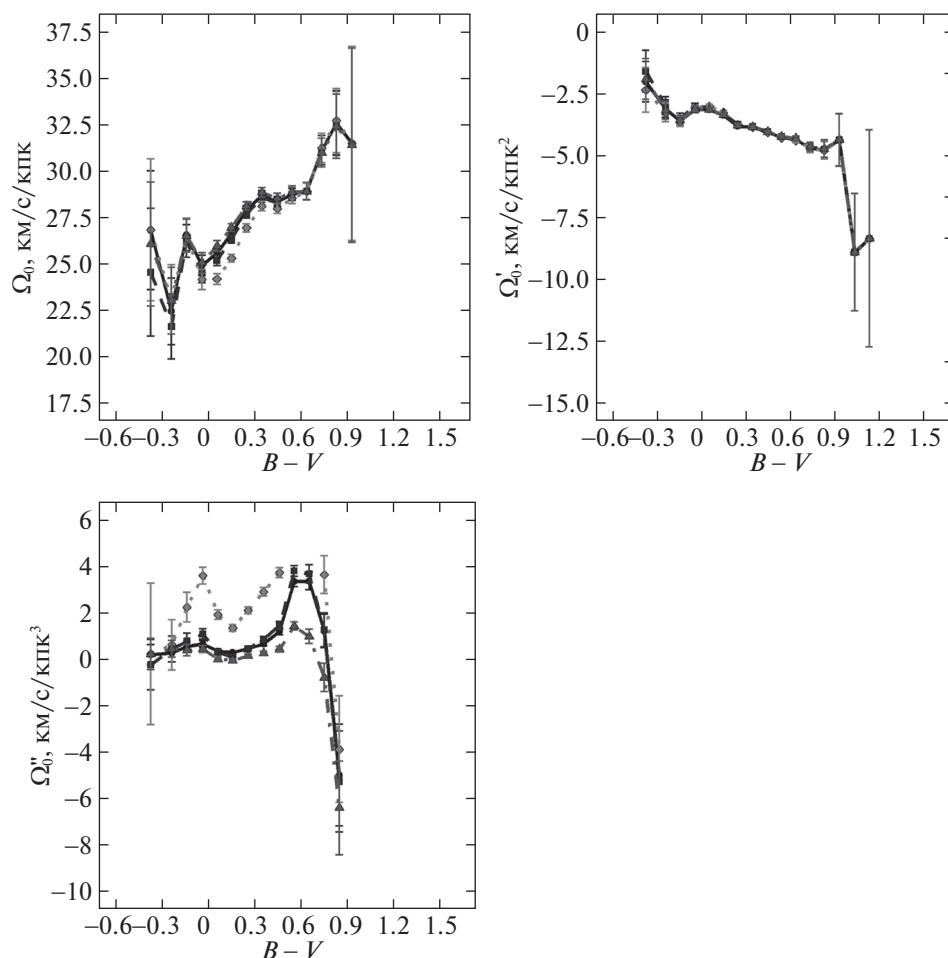


Рис. 4. Зависимости компонент Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 от показателя цвета $B - V$, определенные для звезд главной последовательности каталога TGAS в различных вариантах расстояний: точки — Exp1, штрихпунктирная линия — Exp2, штриховая линия — MW, сплошная линия — Rpi. Модель Боттлингера.

нами данными о показателе цвета Секигучи и др. (2000) и спектральном классе звезд (Михалас, Бинни, 1981). Здесь показана зависимость возраста звезд от эффективной температуры, спектра и $B - V$. Две особенности, которые мы отметили выше, мы видим и на этом рисунке: характерную точку $B - V = 0.7$, а также интервал $[0.4; 0.7]$, на котором происходит быстрое увеличение возраста звезд от 3 до 8 Gyr с последующим медленным уменьшением от 8 до 7 Gyr вплоть до $B - V = 1.4$. Это означает, что холодные звезды имели достаточно времени, чтобы из-за рассеивания увеличить дисперсию скоростей, что в конечном итоге привело к уменьшению азимутального компонента скорости Солнца V (Хай-Джун Тиан и др., 2015). Интересно отметить, что, сделав такой вывод из анализа лучевых скоростей звезд каталога LAMOST DR1, эти авторы не обнаружили уменьшения компонента V за границей точки $B - V = 0.6$. Увеличение дисперсии скоростей звезд должно привести также и к уменьшению компо-

нентов U и W , что наблюдается на рис. 1 и 1 за границей точки $B - V = 0.9$.

Общим для всех параметров является то, что ошибки определения параметров моделей резко увеличиваются при переходе от G- к K-звездам, что может быть объяснено большей дисперсией скоростей звезд спектрального класса K. Аналогичное наблюдение отмечалось в других работах (Денен, Бинни, 1998; Дробитько, Витязев, 2003; Бови, 2017).

В работе Бобылева и Байковой (2007) показано, что параметры U , V , W , полученные по звездам тонкого и толстого дисков, существенно различаются. Наши результаты подтверждают эти выводы (рис. 6). Однако и для тонкого, и для толстого дисков мы видим характерные максимумы зависимости коэффициентов Оорта B в точке $B - V = 0.7$. Аналогично для тонкого и толстого дисков сохраняются максимумы кривых $V = V(B - V)$ в точке $B - V = 0.7$. В обоих случаях мы вновь констатируем исчезновение “плато Паренаго”.

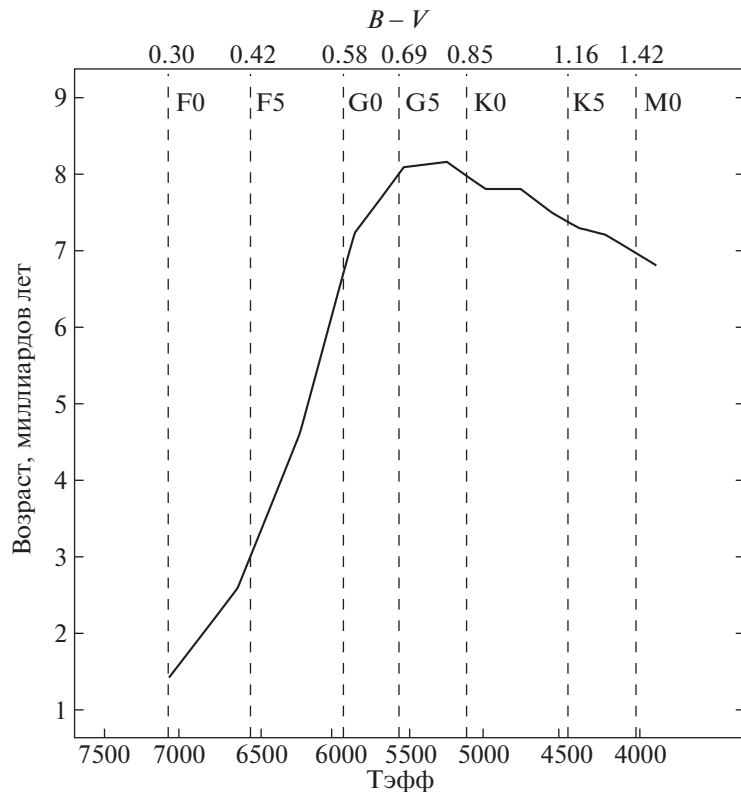


Рис. 5. Зависимость возраста звезд от показателя цвета, эффективной температуры, спектра и $B - V$.

Отметим также, что точка $B - V = 0.6$ в работе Денена, Бинни (1998) и точка $B - V = 0.75$ в нашей работе играют особую роль. Первая точка соответствует переходу из класса F в класс G, и в ней наблюдается классический эффект Паренаго. Точка $B - V = 0.75$ соответствует спектральному классу G5, и в этой точке мы имеем максимумы значений параметров V и B , затем эти параметры начинают убывать при движении в сторону красных звезд. Различие этих значений соответствует половине спектрального класса G. По всей видимости, эффект Паренаго не носит “точечный” характер, а проявляется по-разному для различных подклассов спектрального класса G. Исходя из результатов перечисленных выше работ и наших собственных результатов, можно говорить о том, что проявление эффекта Паренаго в виде “скачка” значений компонента V , по всей видимости, является частным случаем зависимости кинематики от цвета (возраста) звезд, проявляющейся в общем случае в скачках градиентов изменения параметров как функций цвета звезд, а также в уменьшении значений параметров V и B при переходе из спектрального класса G в класс K.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наша работа посвящена исследованию зависимости кинематических параметров моделей

Огородникова–Милна и Боттлингера от показателя цвета для звезд главной последовательности с гелиоцентрическими расстояниями до 1.5 кпк. Для того чтобы оценить влияние низкой точности измерения параллаксов звезд на результаты кинематического анализа таких далеких звезд, мы провели вначале детальное изучение того, как смещаются кинематические параметры, полученные с расстояниями R_{pi} ($1/\pi$), при замене этих расстояний тремя другими вариантами расстояний, приведенными для звезд каталога TGAS в работе Астрадамады и др. (2016b).

Получены детальные табл. 3–6, в которых для звезд каждого спектрального класса показаны оценки смещений параметров кинематических моделей Огородникова–Милна и Боттлингера, вычисленных при оценках расстояний по формуле $1/\pi$, относительно оценок расстояний, учитывающих различные модели распределения звезд в Галактике. Установлено, что изменение варианта расстояний оказывает существенное влияние на компоненты скорости движения Солнца относительно выбранного центра для звезд ранних спектральных классов B и A главной последовательности. Для звезд спектральных классов F, G и K главной последовательности относительные смещения солнечных членов не превосходят 3%.

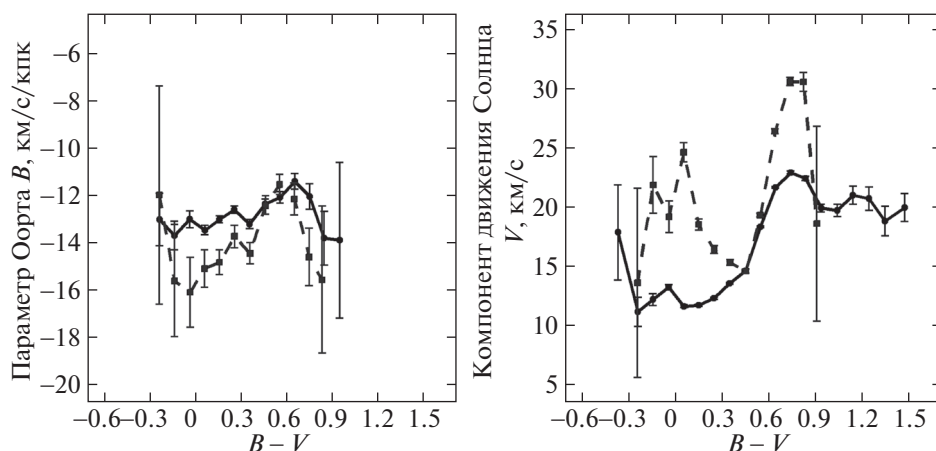


Рис. 6. Параметры B и V в зависимости от показателя цвета $B - V$. Модель Огородникова–Милна. Сплошная линия — тонкий диск $|z| < 0.25$ кпк, штриховая линия — толстый диск $|z| > 0.25$ кпк.

Для красных гигантов смещения параметров U , V , W находятся в пределах от 6 до 35%.

Среди всех остальных кинематических параметров оценки параметров Оорта A и B наименее чувствительны к шкалам расстояний (смещения на уровне 0–3% для большинства спектральных классов). Для остальных параметров величина смещения не превосходит 30%.

Для модели Боттлингера практическую независимость от шкалы расстояний показывают параметры Ω_0 и Ω'_0 (величина смещений не превосходит 4.4%). Таким образом, можно утверждать, что использование шкалы расстояний $1/\pi$ при получении оценок параметров моделей Огородникова–Милна и Боттлингера (кроме параметра Ω''_0) дает надежные результаты даже при использовании параллаксов с большими относительными ошибками (до 60%).

Во второй части статьи изучена зависимость параметров моделей Огородникова–Милна и Боттлингера от показателя цвета для звезд главной последовательности. Отметим, что мы использовали собственные движения более, чем одного миллиона звезд. Насколько нам известно, такой массив данных для исследования эффекта Паренаго используется впервые. Главным результатом этого анализа является обнаружение точки максимума $B - V = 0.75$, после которой при движении от голубых звезд к красным происходит уменьшение значений компонента скорости Солнца V и коэффициента Оорта B . Этот факт является новой чертой эффекта Паренаго, так как в классическом случае при $B - V > 0.6$ значение компонента V не изменяется. Произведена попытка представить хорошо известный эффект Паренаго как частный случай более сложного эффекта плавного изменения ряда кинематических параметров при измене-

нии среднего возраста и состава изучаемой группы звезд.

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за полезные замечания. Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ 6.37.343.2015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арено (F. Arenou), ASP Conf. Ser. **167** (Ed. D. Egret, A. Heck, 1999).
2. Астраатмадя и др. (Astraatmadja, L. Tri, Bailer-Jones, and A.L. Coryn), *Astrophys. J.* **832**, 137 (2016a).
3. Астраатмадя и др. (Astraatmadja, L. Tri, Bailer-Jones, and A.L. Coryn), *Astrophys. J.* **833**, 119 (2016b).
4. Байлер–Джонс (C.A.L. Bailer-Jones), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127**, 994 (2015).
5. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *Astron. Rep.* **51**, 372 (2007).
6. Бови (Jo Bovy), *MNRAS Lett.* **468**, L63 (2017).
7. Валли (J.P. Vallee), *Astrophys. Sp. Sci.* **364**, 79 (2017).
8. Витязев В.В., Цветков А.С., *Письма в Астрон. журн.* **38**, 467 (2012) [V.V. Vityazev, A.S. Tsvetkov, *Astron. Lett.* **38**, 411 (2012)].
9. Витязев В.В., Попов А.В., Цветков А.С., Петров С.Д., Трофимов Д.А., Кияев В.И., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 265 (2018) [V.V. Vityazev, A.V. Popov, A.S. Tsvetkov, S.D. Petrov, D.A. Trofimov, V.I. Kiyayev, *Astron. Lett.* **44**, 236 (2018)].
10. Денен, Бинни (W. Dehnen and J.J. Binney), *MNRAS* **298**, 387 (1998).
11. Дробитько Е.В., Витязев В.В., *Астрофизика* **46**, вып. 2 (2003).
12. Куликовский П.Г., *Звездная астрономия* (М.: Наука, 1985).
13. Линдгрен и др. (L. Lindgren, U. Lammers, U. Bastian, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 323 (2016).

14. Лутц, Келкер, (T.E. Lutz and D.H. Kelker), Publ. Astron. Soc. Pacific **85**, 573 (1973).
15. Михалас, Бинни (Mihalas and Binney), *Galactic Astronomy. Structure and Kinematics* (2nd Ed. San Francisco, 1981).
16. Миямото и др. (M. Miyamoto, M. Soma, and M. Yokoshima), Astron. J. **105**, 2138 (1993).
17. дю Монт (B.A. du Mont), Astron. Astrophys. **61**, 127 (1977).
18. Огородников К.Ф., *Динамика звездных систем* (М.: Физматгиз, 1965).
19. Паренаго П.П., Астрон. журн. **27**, 150 (1950).
20. Секигучи, Фукугита (M. Sekiguchi and M. Fukugita), Astron. J. **120**, 1072 (2000).
21. Смит, Эйххорн (H. Smith, Jr1 and H. Eichhorn), MNRAS **281**, 211 (1996).
22. Торра и др. (J. Torra, D. Fernandez, and F. Figueras), Astron. Astrophys. **359**, 82 (2000).
23. Хай-Джун Тиан и др. (Hai-Jun Tian, Chao Liu, J. Carlin, Yong-Heng Zhao, Xue-Lei Chen, Yue Wu, G.-W. Li, Y.-H. Hou, and Y. Zhang), Astrophys. J. **809**, 145 (2015).
24. Хенден и др. (A.A. Henden, S. Levine, D. Terrell, and D.L. Welch), Am. Astron. Soc. Meet. **225**, 336.16 (2015).