

## О СВОЙСТВАХ ГАЛАКТИЧЕСКОГО СЛОЯ ПЫЛИ В РАДИУСЕ 700 пк ОТ СОЛНЦА

© 2019 г. Г. А. Гончаров\*

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

Поступила в редакцию 03.03.2019 г.; после доработки 20.05.2019 г.; принята к публикации 28.05.2019 г.

Для уточнения свойств слоя пыли в галактических окрестностях Солнца пространственные вариации цвета звезд сопоставлены с трехмерной аналитической моделью пространственного распределения пыли. Использована полная выборка 93 992 гигантов сгущения с незначительной примесью гигантов ветви из каталога Gaia DR2 в пространственном цилиндре радиусом 700 пк вокруг Солнца, протянувшимся до  $|Z| = 1800$  пк вдоль галактической координаты  $Z$ . Точные параллаксы и фотометрия этих звезд в полосах Gaia DR2  $G_{RP}$  и WISE  $W3$  позволили использовать пространственные вариации цвета  $G_{RP} - W3$  для вычисления параметров модели и двух характеристик выборки — моды нормального цвета  $(G_{RP} - W3)_0$  сгущения гигантов и линейного изменения этой моды с координатой  $|Z|$ . В результате получена улучшенная версия трехмерной модели, впервые предложенной Гончаровым (2009б). Как и в прежней версии, модель предполагает два слоя пыли, вдоль экватора Галактики и в поясе Гулда, которые пересекаются вблизи Солнца под углом  $18 \pm 2$  градусов. В отличие от прежней версии модели с основной плоскостью пылевого слоя пояса Гулда в виде круга с центром в Солнце, в новой версии эта плоскость является эллипсом, децентрированным относительно Солнца. Для обоих слоев пыли найдена шкала высот  $170 \pm 40$  пк. Для гигантов вдали от плоскости Галактики ( $|Z| > 600$  пк) найдено довольно большое покраснение  $E(G_{RP} - W3) = 0.16 \pm 0.02$  сквозь половину галактического слоя пыли выше или ниже Солнца. Это может объясняться возможным отличием закона поглощения вдали от плоскости Галактики от обычно принимаемого закона Карделли, Клэйтона, Матиса 1989 г. с  $R_V = 3.1$ . Для сгущения гигантов вблизи Солнца вычислены моды абсолютной величины  $M_{W3} = -1.70 \pm 0.02$  и нормального цвета  $(G_{RP} - W3)_0 = (1.43 \pm 0.01) - (0.020 \pm 0.007)|Z|$ , где  $Z$  выражена в килопарсеках. Эти оценки согласуются с оценками по теоретическим изохронам PARSEC и MIST для выборки, в которой преобладают гиганты возрастом 2 млрд лет и металличностью  $[Fe/H] = -0.1$  в согласии с моделью звездного населения TRILEGAL. Дисперсии рассматриваемых величин позволили охарактеризовать естественные мелкомасштабные флуктуации плотности пылевой среды относительно среднего покраснения, вычисляемого по модели. Эти флуктуации вносят основной вклад в неопределенность покраснения. Из-за них покраснение конкретной звезды может отличаться от модельного покраснения на случайную величину, которая уменьшается с 80 до  $<20\%$  от величины модельного покраснения при переходе от низких широт вдали от Солнца к остальному пространству.

*Ключевые слова:* диаграмма Герцшпрунга–Рассела, галактические окрестности Солнца, звезды-гиганты.

**DOI:** 10.1134/S0320010819080035

### ВВЕДЕНИЕ

Свойства слоя пыли в нашей Галактике обычно определяются из наблюдений звезд, находящихся внутри или за этим слоем. Поэтому до сих пор ошибки расстояний и фотометрии звезд ограничили наши знания об этом слое.

Например, параллаксы Hipparcos достаточно точны только в радиусе около 100 пк от Солнца, в то время как слой пыли простирается вдоль

галактической координаты  $Z$  (в направлении галактических полюсов) и тем более в других направлениях гораздо дальше. Например, простейшая модель распределения пыли, весьма популярная у исследователей, предполагает экспоненциальное в зависимости от  $|Z|$  распределение пыли в одном слое и, следовательно, изменение кумулятивного покраснения по барометрическому закону (Паренана, 1954, с. 265)

$$E(B - V)_R = \tag{1}$$

$$= E(B - V)(1 - e^{-|Z - Z_0|/Z_A}),$$

\*Электронный адрес: georgegontcharov@yahoo.com

где  $E(B - V)_R$  — покраснение до расстояния  $R$ ,  $E(B - V)$  — покраснение до бесконечности на том же луче зрения,  $Z_0$  — смещение основной плоскости слоя пыли вдоль  $Z$  относительно Солнца,  $Z_A$  — шкала высот слоя пыли. В таком случае толщина слоя, содержащего, скажем, 95% пыли и, таким образом, вносящего заметный вклад в оценки покраснения и поглощения, втрое превышает  $Z_A$ . Различные оценки шкалы высот слоя пыли даны, например, Перриманом (2009, с. 470–471, 496–497). Примеры разнообразия таких оценок для слоя пыли вблизи Солнца:  $< 70$  пк (Юрич и др., 2008),  $\approx 100$  пк (Гончаров, 2012б), 140 пк (Робин и др., 2003), 188 пк (Дриммель, Шпергель, 2001). Таким образом, предполагая  $Z_A < 200$  пк, для того, чтобы проследить вариации плотности пылевой среды поперек слоя, мы должны использовать фотометрию полной выборки звезд хотя бы до  $|Z| < 600$  пк.

Результаты проекта Gaia, включая релиз Gaia DR2 (Гая, 2018а), впервые позволяют заглянуть так далеко. Параллаксы, свободные от существенных систематических и случайных ошибок (для этого достаточна относительная точность параллакса 10%), и фотометрия в полосах Gaia  $G$ ,  $G_{BP}$  и  $G_{RP}$  с медианной точностью лучше 0.01 звездной величины теперь известны в радиусе, по крайней мере, 2 кпк от Солнца для всех звезд Главной последовательности классов O–G и всех гигантов (Гая, 2018б). Это позволяет впервые проанализировать полные выборки звезд различных классов в широких галактических окрестностях Солнца как внутри, так и вне слоя пыли. В результате можно определить ключевые характеристики этого слоя. Настоящее исследование является первым исследованием такого рода.

Вероятно, реальное распределение пыли в галактических окрестностях Солнца сложнее экспоненциального распределения в единственном слое. На это указывают, в частности, следующие исследования:

- Согласно Дриммелю, Шпергелю (2001), шкала высот слоя пыли меняется в зависимости от галактоцентрического расстояния. Поэтому в первом исследовании нам стоит ограничиться пространством, где характеристики пылевого слоя не меняются или меняются незначительно.
- Кос и др. (2014) получили различающиеся примерно вдвое оценки шкалы высот слоя пыли для разных длин волн поглощаемого пылью излучения:  $118 \pm 5$  и  $209 \pm 12$  пк соответственно для наиболее исследованной фракции пыли, вызывающей поглощение в видимом диапазоне, на длине волны около

0.5 мкм, и для пыли, создающей диффузную межзвездную линию на длине волны 0.862 мкм. При наличии естественной связи между размером пылинки и длиной волны поглощаемого и рассеиваемого ею излучения (см. обзор Гончарова, 2016б) результат Кос и др. (2014) позволяет предположить, что пылинки большего размера создают в Галактике более толстый слой. Одним из следствий этого была бы зависимость закона поглощения (т.е. поглощения как функции длины волны) от  $|Z|$ . Действительно, такая зависимость найдена в нескольких исследованиях (Гончаров, 2016б) и, в частности, Гончаровым (2012а, 2013б, 2016а) — в исследованиях, схожих с настоящим — при анализе полных выборок гигантов в протяженных по  $Z$  областях пространства. Поэтому нам стоит предположить зависимость характеристик пылевого слоя от рассматриваемого показателя цвета звезд и, следовательно, рассматривать разные показатели цвета независимо. В настоящем исследовании рассматривается только один показатель цвета. Это не позволяет сделать какие-либо выводы о законе поглощения в рассматриваемом пространстве. Но, с другой стороны, полученные характеристики слоя пыли не зависят от закона поглощения.

- Как показали многочисленные тесты, упомянутые далее, предложенная Гончаровым (2009б, 2012б) модель распределения пыли в двух слоях, экваториальном (около основной плоскости Галактики) и наклонном к нему слое в поясе Гулда, соответствует наблюдениям лучше, чем модель с экспоненциальным распределением пыли в одном слое при любых характеристиках такого слоя, а также — лучше, чем прежние модели Арену и др. (1992) и Дриммеля, Шпергеля (2001) (реализованная в трехмерной карте покраснения Дриммеля и др. (2003)). Поэтому в настоящем исследовании рассматривается модель Гончарова (2009б, 2012б), ее новая версия, приближенная к реальности. В качестве контейнера пыли и причины покраснения звезд пояс Гулда впервые рассмотрен, видимо, Вержели и др. (1998). Однако окончательный вывод о существовании дополнительного слоя пыли в поясе Гулда можно сделать лишь на основе нескольких исследований с использованием разнообразных современных данных (разных трехмерных карт покраснения, фотометрии из разных обзоров).

Параметры рассматриваемой модели вычислялись в первом (Гончаров, 2009б) и втором (Гончаров, 2012б) решениях с использованием различных источников данных о покраснении и поглощении.

В настоящем исследовании характеристики галактического слоя пыли в окрестностях Солнца в рамках новой версии рассматриваемой модели вычисляются из анализа пространственных вариаций наблюдаемого показателя цвета для полной выборки гигантов из Gaia DR2 совместно с двумя характеристиками этих гигантов — их нормальным цветом вблизи Солнца и изменением нормального цвета с координатой  $|Z|$ . Отметим, что некоторые характеристики, определяемые в настоящем исследовании (например, полное покраснение сквозь полуслой пыли в направлении галактических полюсов, нормальный цвет звезд вблизи Солнца, изменение нормального цвета с координатой  $|Z|$ ), не зависят от принятой модели, так как фактически вычисляются из разности показателя цвета для близких к Солнцу гигантов и гигантов того же типа, расположенных заведомо за пределами слоя пыли.

У любой модели покраснения/поглощения есть непреодолимое ограничение. Модель присваивает точке пространства значение покраснения/поглощения, осредненное для некоей области пространства вокруг этой точки. Но мелкомасштабные флуктуации плотности пылевой среды существуют внутри даже самой малой области осреднения. Во всяком случае, они проявляются на масштабе типичного расстояния между соседними звездами для любой выборки звезд Галактики, если учесть, что это расстояние сравнительно велико. Согласно Безансонской модели Галактики (Чекай и др., 2014), пространственная плотность звезд всех типов в окрестностях Солнца не превышает 0.05 массы Солнца на кубический парсек, т.е. с учетом доминирования красных карликов с массой порядка 0.1 массы Солнца среднее расстояние между звездами составляет порядка 1 пк. Поэтому любая модель принципиально не может учесть эти мелкомасштабные флуктуации (хотя они могут быть учтены при вычислении покраснения звезды по ее индивидуальным данным). Тем не менее наблюдаемый разброс показателя цвета позволяет получить статистические оценки мелкомасштабных флуктуаций пылевой среды. Эта тема почти не исследована (см. рассуждения Грина и др., 2015). Но очевидно, что флуктуации плотности пылевой среды уменьшаются при уменьшении самой плотности так, что, с учетом флуктуаций, плотность остается неотрицательной величиной в любой точке пространства. В настоящем исследовании предпринята попытка оценить эти флуктуации и соответствующие ограничения на применимость рассматриваемой модели, исходя из наблюдаемого разброса показателя цвета.

## ВЫБОР МОДЕЛИ

Для описания пространственного распределения пыли, соответствующего покраснения звезд и межзвездного поглощения создано множество карт и аналитических моделей. Различие между ними в том, что карты описывают пылевую среду в точке пространства тем или иным числом, а модели — той или иной функцией галактических координат. Модели, в отличие от карт, явно или неявно включают характеристики пылевого слоя.

Реальная точность (прежде всего, в систематическом отношении) наиболее популярных и точных моделей и карт проанализирована в последние годы с использованием точных параллаксов Gaia и теоретических изохрон и моделей Галактики.

1. Гончаров (2017а) и Гончаров, Мосенков (2017а, 2017б, 2018) поместили на диаграмму Герцшпрунга—Рассела (ГР) звезды с точными параллаксами из каталога Gaia DR1 TGAS (Михалик и др., 2015) и точной фотометрией из различных обзоров неба для анализа распределения этих звезд относительно теоретических изохрон PAdova and TRieste Stellar Evolution Code (PARSEC) (Бреccан и др., 2012; <http://stev.oapd.inaf.it/cmd>), MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST) (Пакстон и др., 2011; Чой и др., 2016; Доттер, 2016; <http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>), Yale-Potsdam Stellar Isochrones (YAPSI) (Спада и др., 2017; <http://www.astro.yale.edu/yapsi/>) и теоретических распределений по Безансонской модели Галактики и модели Галактики TRILEGAL (Жирарди и др., 2005; <http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/trilegal>).
2. Гончаров, Мосенков (2019) использовали оценки покраснения  $E(B - V)$  и межзвездной поляризации  $P$  для звезд Gaia DR2 в радиусе 500 пк от Солнца для того, чтобы сопоставить пространственные вариации эффективной поляризации  $P/E(B - V)$  с теоретическими представлениями о межзвездной среде. Кроме того, Гончаров, Мосенков (2019) обработали заново с использованием параллаксов Gaia DR2 данные Уэлш и др. (2010) о пространственных вариациях эквивалентных ширин спектральных линий поглощения Na I и Ca II, которые говорят о трехмерном распределении межзвездного газа и пыли, и сравнили их с оценками по различным моделям и картам покраснения.
3. Гончаров и др. (2019) проанализировали распределение звезд галактического шарового скопления NGC5904 (M5) на диаграмме “цвет—величина” на основе 29-полосной

фотометрии относительно теоретических изохрон PARSEC, MIST, Dartmouth Stellar Evolution Program (DSEP) (Доттер и др., 2007; <http://stellar.dartmouth.edu/models/>) и A Bag of Stellar Tracks and Isochrones (BaSTI) (Петринферни и др., 2004; <http://basti.oa-teramo.inaf.it>) и вычислили наиболее вероятные характеристики этого скопления, включая поглощения во всех 29 полосах, соответствующие покраснения и закон поглощения.

Эти и другие тесты показали, что наиболее точны модели и карты покраснения, основанные на данных для полных выборок звезд и учитывающие неоднородное распределение пыли вблизи Солнца (на расстоянии  $R < 400$  пк), включая вариации распределения пыли с галактической долготой  $l$ . В частности, наиболее точные вдали от Солнца трехмерные карты Грина и др. (2015, 2018) вблизи Солнца показали низкую точность, так как они основаны на фотометрии далеких звезд, а для ближайших примерно 400 пк просто интерполируют покраснение между покраснением для этих звезд и нулевым покраснением около Солнца. В качестве карты, демонстрирующей явные систематические ошибки из-за существенной неполноты использованной выборки звезд, стоит упомянуть трехмерную карту Лаллемент и др. (2018).

В упомянутых тестах модель с экспоненциальным распределением пыли в одном слое применялась к лучшим двумерным (т.е. с оценками покраснения сквозь весь полуслой галактической пыли от Солнца до бесконечности) картам покраснения Шлегеля и др. (1998) и Майснера, Финкбайнера (2015). Эти карты получены по данным об инфракрасном (ИК) излучении пыли с помощью телескопов IRAS/ISSA + COBE/DIRBE и IRAS/ISSA + Planck соответственно и откалиброваны по оценкам покраснения эллиптических галактик, квазаров и звезд. Тесты показали, что экспоненциальное распределение пыли слишком далеко от реальности, так как дает ошибочные (прежде всего, в систематическом отношении) оценки покраснения для реальных звезд.

Среди остальных трех моделей распределения пыли в галактических окрестностях Солнца наилучшие результаты в тестах показала модель Гончарова (2009б; 2012б). Видимо, ее преимуществами являются явный учет дополнительного слоя пыли в поясе Гулда и варьирование пространственной плотности пыли с долготой в обоих слоях, экваториальном и в слое пояса Гулда. Модели Арену и др. (1992) и Дриммеля, Шпергеля (2001) оказались хуже. Причины этого фактически отмечены еще авторами этих моделей. Модель Арену и др. (1992) опирается на наблюдения сравнительно

малого числа звезд, особенно вдали от плоскости Галактики, и в результате для обширных высокоширотных областей неба эта модель вынуждена ограничиться постоянными значениями поглощения. Впрочем, в низких широтах модель Арену и др. (1992) показала хорошие результаты и значения поглощения, близкие к значениям по модели Гончарова (2009б, 2012б). Модель Дриммеля, Шпергеля (2001) учитывает неоднородно распределенную пыль в галактических окрестностях Солнца в виде сегмента рукава Ориона–Лебеда. Но сами авторы признают, что район около Солнца стоит описать более детальной моделью распределения пыли (Дриммель и др., 2003).

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассматриваемая модель описывает пространственные вариации покраснения в радиусе нескольких сотен парсек от Солнца, т.е. в небольшой части Галактики. Поэтому рассматриваемый в модели экваториальный слой пыли можно считать бесконечным в направлениях  $X$  и  $Y$ . В отличие от него, слой пыли в поясе Гулда имеет конечный размер. В прежних версиях модели он имел круглую основную плоскость с центром в Солнце. Теперь эта плоскость — эллипс, с центром, смещенным относительно Солнца по всем трем координатам, большой полуосью  $A$ , малой полуосью  $a$ , эксцентриситетом  $e$  и углом  $\eta$  между большой полуосью и направлением максимального покраснения. Покраснение в поясе вычисляется в направлении звезды только до расстояния  $R_0$  от Солнца до края пояса, если звезда находится дальше края, или до звезды, если она ближе края. Координаты звезды в системе координат пояса Гулда:  $\zeta$  — кратчайшее расстояние от звезды до основной плоскости пояса (аналог  $Z$  в галактической системе координат),  $\beta$  — широта, отсчитываемая от основной плоскости пояса, и  $\lambda$  — долгота, отсчитываемая от направления максимального покраснения в слое пояса. Слои пересекаются под углом  $\gamma$ . Угол между осью координат  $Y$  и линией пересечения слоев обозначен  $\theta$ . Эти величины связаны следующими соотношениями:

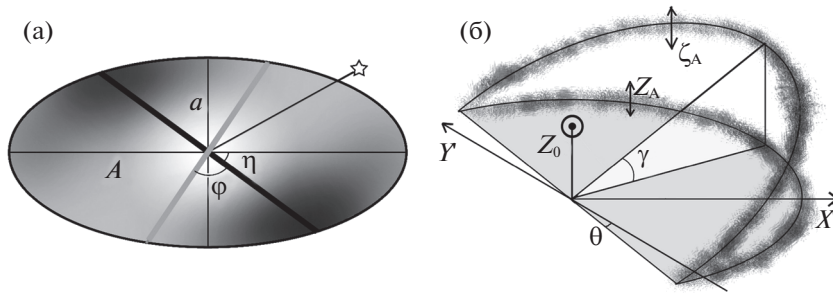
$$a^2 = A^2(1 - e^2), \quad (2)$$

$$R_0 = a/(1 - (e \cos(\lambda - \eta))^2)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\zeta = \min(R, R_0) \sin(\beta), \quad (4)$$

$$\sin(\beta) = \cos(\gamma) \sin(b) - \sin(\gamma) \cos(b) \cos(l), \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}(\lambda - \theta) = \cos(b) \sin(l) / [\sin(\gamma) \sin(b) + \cos(\gamma) \cos(b) \cos(l)]. \quad (6)$$



**Рис. 1.** Схема эллиптической основной плоскости слоя пыли в поясе Гулда (а) и пересекающихся основных плоскостей двух слоев (б). На схеме (а) тонировкой условно показана плотность распределения пыли, толстая черная линия — направление максимального покраснения, тонкими черными линиями отмечены большая  $A$  и малая  $a$  полуоси эллипса слоя, отмечены углы  $\eta$  и  $\phi$ , толстая серая линия — линия пересечения слоев (на схеме для простоты проходит через центр эллипса слоя, хотя в модели смещена относительно него), отмечено также направление на некую звезду. На схеме (б) отмечены направления  $X'$  и  $Y'$ , параллельные осям  $X$  и  $Y$ , возвышение Солнца над экваториальным слоем  $Z_0$ , шкалы высот  $Z_A$  и  $\zeta_A$ , углы  $\gamma$  и  $\theta$ .

Экваториальный слой смещен относительно Солнца вдоль  $Z$  на расстояние  $Z_0$ , а слой пояса Гулда — вдоль координат  $X, Y, Z$  на  $x_0, y_0$  и  $z_0$  соответственно.

Схема основных плоскостей слоев пыли в рассматриваемой модели показана на рис. 1: отдельно эллиптическая основная плоскость слоя пыли в поясе Гулда (а) и пересекающиеся основные плоскости двух слоев (б).

Покраснение звезды рассматривается как сумма покраснений в двух слоях. Каждое покраснение является функцией галактических координат и описывается барометрическим законом с синусоидальными вариациями в зависимости от долготы внутри слоя:

$$(E0_{\text{equator}} + E1_{\text{equator}} \sin(l + \Phi)) \times (7) \\ \times R(1 - e^{-|Z - Z_0|/Z_A})Z_A/|Z - Z_0|$$

для экваториального слоя и

$$(E0_{\text{Gould}} + E1_{\text{Gould}} \sin(2\lambda + \phi)) \times (8) \\ \times \min(R, R_0)(1 - e^{-|\zeta|/\zeta_A})\zeta_A/|\zeta|$$

для слоя в поясе Гулда. Здесь  $Z_A, E0_{\text{equator}}, E1_{\text{equator}}$  и  $\Phi$  — шкала высот, свободный член, амплитуда и фаза покраснения в синусоидальной зависимости от  $l$  для экваториального слоя;  $\zeta_A, E0_{\text{Gould}}, E1_{\text{Gould}}$  и  $\phi$  — шкала высот, свободный член, амплитуда и фаза покраснения в синусоидальной зависимости от  $2\lambda$  для слоя в поясе Гулда. Вычисления выполнены и с членом  $\sin(\lambda + \phi)$  в формуле (8), но наблюдениям лучше соответствует модель с членом  $\sin(2\lambda + \phi)$ , т.е. с двумя максимумами покраснения в поясе Гулда. Эти максимумы приходятся примерно на долготы наиболее богатых пылью облачных комплексов Скорпиона–Змееносца–Стрельца и Персея–Тельца–Ориона, расположенных примерно на долготах центра и

антицентра Галактики соответственно. Это согласуется с общепринятыми представлениями о распределении пыли в поясе Гулда (Перриман, 2009, с. 324–328; Бобылев, 2014).

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Гиганты сгущения наиболее подходят для настоящего исследования, так как яркие, многочисленны и сравнительно легко выделяются на диаграмме ГР по фотометрии. Это звезды после прохождения ветви гигантов и гелиевой вспышки. Гигант сгущения состоит из инертной водородной оболочки и гелиевого ядра, в котором идут ядерные реакции превращения гелия в углерод. Обзор современных представлений о таких звездах дан в работе Жирарди (2016). Выборки гигантов сгущения из различных фотометрических обзоров сформированы в последние годы разными авторами (см. обзор Гончарова, 2016б) и уже использовались, кроме прочего, для анализа свойств пылевой среды в широких галактических окрестностях Солнца (Гончаров, 2013а,б, 2016а).

Как отмечено во Введении, точность параллаксос и фотометрии Gaia DR2 позволяет рассмотреть полную выборку гигантов сгущения в радиусе, по крайней мере, 2 кпк от Солнца. Для проверки гипотезы о покраснении в пылевом слое пояса Гулда ограничимся пространством, где пояс должен играть важную роль. Пояс напоминает сравнительно плоский диск радиусом около 400–500 пк, децентрированный относительно Солнца на несколько десятков пк и наклоненный к плоскости Галактики на угол около  $20^\circ$  (Перриман, 2009, с. 324–328; Бобылев, 2014). Поэтому введем ограничение  $(X^2 + Y^2)^{1/2} < 700$  пк, где  $X$  и  $Y$  — галактические прямоугольные координаты в направлении центра Галактики и ее вращения соответственно. Кроме того, учитывая падение плотности распределения

звезд с  $|Z|$ , во избежание неоправданного влияния на результат немногочисленных звезд с большим  $|Z|$ , ограничим выборку  $|Z| < 1800$  пк. Таким образом, мы рассматриваем пространственный цилиндр радиусом 700 пк вокруг Солнца, протянувшийся до  $|Z| < 1800$  пк.

Для выборки использованы расстояния, полученные Байлер-Джонсом и др. (2018) по параллаксам Gaia DR2. Ошибки этих расстояний столь малы, что не влияют на результаты настоящего исследования: медиана относительной ошибки расстояния составила 2%. Расстояния 658 звезд выборки (0.7%) имеют относительную точность хуже 10%, но эти звезды оставлены в выборке, так как довольно равномерно распределены в пространстве и не влияют на результаты.

Набор полос с точной (медианная точность на уровне 0.01 звездной величины) фотометрией для гигантов сгущения во всем рассматриваемом пространстве весьма ограничен (см. анализ Гончарова (2016а)). Например, с учетом абсолютной величины гигантов сгущения их фотометрия из каталога Tycho-2 (Хег и др., 2000) точна, и, следовательно, их выборка полна только до 600 и 740 пк в полосах  $B_T$  и  $V_T$  соответственно. ИК-фотометрия гигантов сгущения, как правило, наоборот, неточна для самых близких к Солнцу звезд, так как они слишком ярки в ИК-диапазоне для многих детекторов. Например, в полосах  $J$ ,  $H$ ,  $K_s$  каталога Two Micron All-Sky Survey (2MASS) (Скрутские и др., 2006) и в полосах  $W1$ ,  $W2$  каталога allWISE (Райт и др., 2010; <http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/wise.html>) телескопа Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) фотометрия гигантов сгущения неточна в радиусе 150–500 пк от Солнца (в зависимости от полосы), т.е. в самом важном для нас районе с максимальными вариациями плотности распределения пыли.

Gaia DR2 является первым обзором с точной фотометрией в оптическом диапазоне для гигантов сгущения во всем рассматриваемом пространстве. Поэтому для получения предварительной полной выборки использована диаграмма ГР вида “ $(G_{BP} - G_{RP}) - (G_{RP} + 5 - 5 \log(R))$ ”. На ней отобраны все звезды в сгущении гигантов по критериям  $1.0 < G_{BP} - G_{RP} < 2.3$ ,  $-0.6 < G_{RP} + 5 - 5 \log(R) < 1.5$  и дополнительным критериям для отсева субгигантов  $G + 5 - 5 \log(R) < 1.75(G_{BP} - G_{RP}) - 1.25$ ,  $G + 5 - 5 \log(R) > 1.92(G_{BP} - G_{RP}) - 2.12$ , без исправления за покраснение и поглощение. Фотометрия отобранных звезд оказалась очень точна: для всех звезд  $\sigma(G_{BP}) < 0.05$ ,  $\sigma(G_{RP}) < 0.03$ , медианы  $\sigma(G_{BP})$  и  $\sigma(G_{RP})$  равны 0.001.

Для более надежных результатов совместно с полосой в оптическом диапазоне стоит использовать полосу в ИК. Почти все звезды предва-

рительной выборки имеют точную фотометрию в полосе AllWISE  $W3$  (с эффективной длиной волны 10.8 мкм). Полоса  $W3$  уже использована в схожем исследовании Гончаровым (2017), который показал, что она удобна, кроме прочего, благодаря малому поглощению. Окончательная выборка сформирована из предварительной отбором по критериям  $G_{RP} - W3 > 1$  и  $-2 < W3 + 5 - 5 \log(R) < -1.25$  без исправления за покраснение и поглощение. Кроме того, отброшены 94 звезды с неточной фотометрией  $W3$ . В итоге выборка содержит 93 992 звезды.

Потеряв всего 94 звезды с неточной фотометрией в полосе  $W3$ , отметим для сравнения, что в ИК-полосах 2MASS  $J$ ,  $H$ ,  $K_s$  и AllWISE  $W1$ ,  $W2$ ,  $W4$  не имеют фотометрии точнее 0.05 звездной величины 1637, 10 328, 1304, 40 609, 7489 и 77 355 звезд выборки соответственно. Следовательно, только использование полосы  $W3$  сохраняет полноту выборки на приемлемом уровне. Использование полос  $J$  и  $K_s$ , видимо, также возможно в будущих исследованиях после дополнительного исследования, насколько соответствующая неполнота влияет на результат. Остальные полосы, очевидно, не могут использоваться в подобном исследовании.

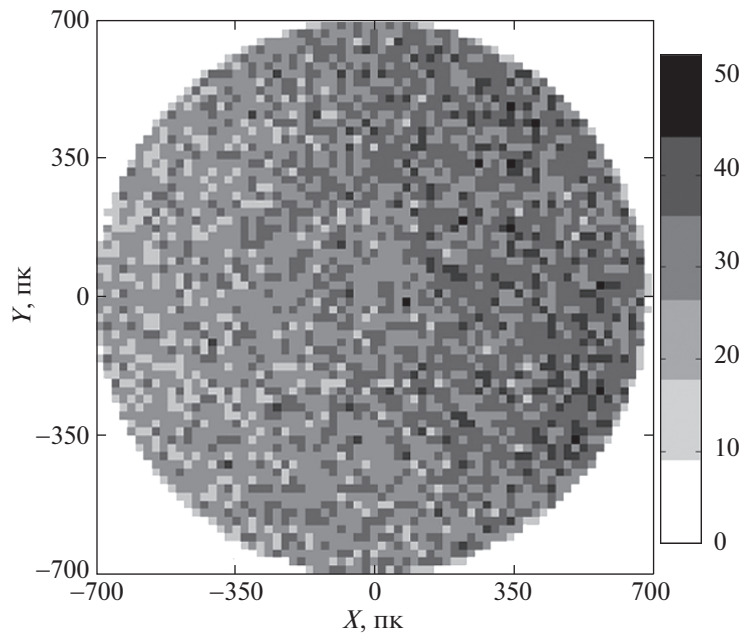
Полнота полученной выборки видна на рис. 2, где показано распределение звезд выборки в проекции на плоскость  $XY$  в квадратах размером  $20 \times 20$  пк. Как и ожидалось, пространственное распределение звезд слабо растет в направлении центра Галактики (справа), но не уменьшается с расстоянием от Солнца, что было бы в случае неполноты выборки.

На результаты настоящего исследования могли бы повлиять очень большая ширина полосы  $G$  и удаленность друг от друга полос  $G_{BP}$  и  $W3$ . Поэтому здесь рассматривается только один цвет из возможных —  $G_{RP} - W3$ .

На рис. 3 показано распределение звезд выборки на диаграмме ГР вида “ $(G_{RP} - W3) - (M_{W3})$ ” (а) до и (б) после исправления за найденное в настоящем исследовании покраснение  $E(G_{RP} - W3)$ , а также — за поглощение  $A_{W3}$ , вычисленное как

$$A_{W3} = 0.0135E(G_{RP} - W3) \quad (9)$$

в соответствии с законом поглощения Карделли и др. (1989, далее — CCM89) с  $A_V/E(B - V) = 3.1$ . Этот закон предполагает также  $A_{G_{RP}} = 2.03E(B - V)$ ,  $A_{W3} = 0.027E(B - V)$  и  $E(G_{RP} - W3) = 2.00E(B - V)$ . Отметим, что покраснение  $E(G_{RP} - W3)$  вычислено исключительно на основе наблюдаемых пространственных вариаций цвета  $G_{RP} - W3$  и поэтому совершенно не зависит от закона поглощения. Более того, использование того или иного конкретного закона поглощения для этой диаграммы ГР меняет ее вид



**Рис. 2.** Распределение звезд выборки в проекции на плоскость  $XY$  в квадратах размером  $20 \times 20$  пк. Солнце — в центре, центр Галактики — справа. Справа дана шкала тонировки.

незначительно, так как коэффициент в соотношении (9) очень мал. Также отметим, что закон поглощения ССМ89 никак нельзя считать неким “стандартом”, особенно в ИК-диапазоне, так как, например, не менее обоснованный наблюдениями закон поглощения Вайнгартнера, Дрейна (2001) дает соотношение

$$A_{W3} = 0.14E(G_{RP} - W3), \quad (10)$$

с коэффициентом, который на порядок больше коэффициента в соотношении (9).

Для звезд выборки медиана  $|Z|$  составила 212 пк. 74 и 90% звезд имеют  $|Z| < 400$  и 700 пк соответственно. Следовательно, большинство звезд выборки находится внутри галактического слоя пыли. Распределение выборки вдоль  $Z$  близко к нормальному со средним значением  $-22$  пк (так проявилось смещение Солнца вдоль  $Z$  относительно основной плоскости Галактики) и стандартным отклонением 426 пк. Это распределение типично для гигантов сгущения в окрестностях Солнца (Гончаров, 2008, рис. 6). Такое пространственное распределение выборки удобно для исследований слоя пыли. Однако мы не можем сделать выводы о пространственном распределении именно гигантов сгущения, так как в настоящем исследовании не применялись какие-либо способы очистки выборки от примеси гигантов ветви, рассмотренные, например, Гончаровым (2008, 2009а). Гиганты ветви в том же пространстве имеют несколько отличные от гигантов сгущения характеристики (нормальный цвет, абсолютную величину, возраст

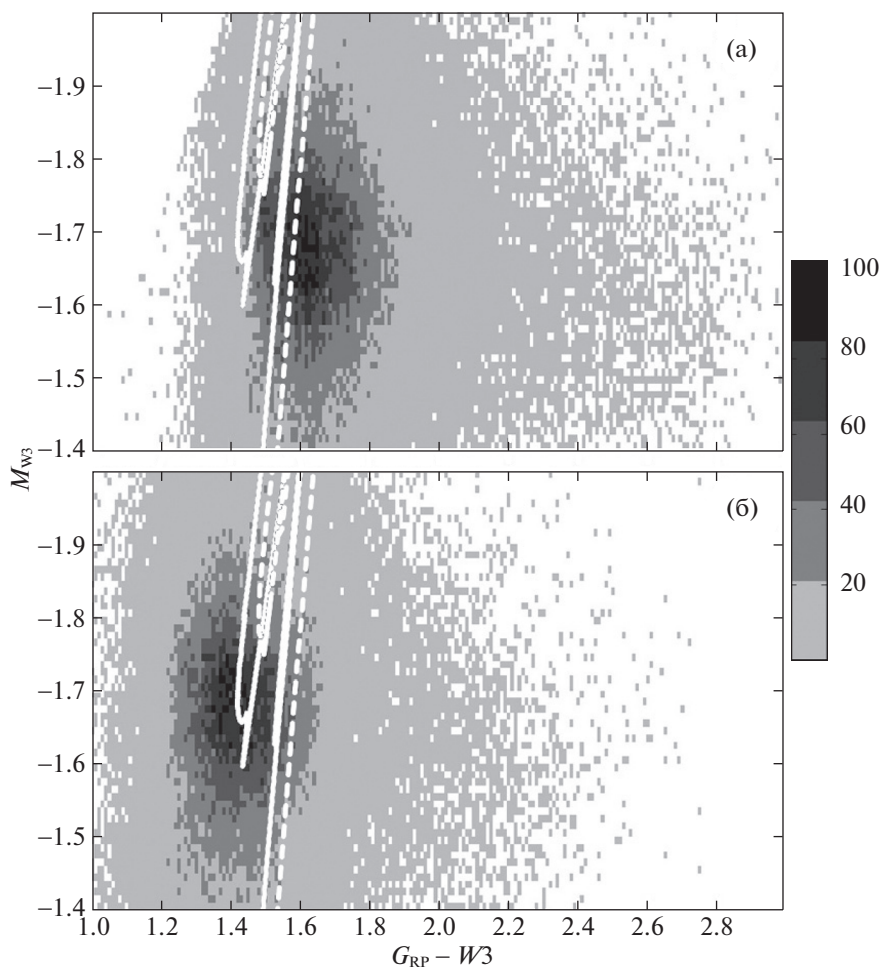
и металличность). Однако Гончаров (2017) на примере выборки гигантов сгущения из Gaia DR1 показал, что примесь гигантов ветви в такой выборке существенно влияет на пространственные вариации средних значений  $G_{RP} - W3$  и  $(G_{RP} - W3)_0$ , но совершенно не влияет на моды этих цветов, т.к. всюду в рассматриваемой области диаграммы ГР и рассматриваемой области пространства гиганты сгущения составляют подавляющее большинство. Для оценки влияния примеси гигантов ветви на результат в настоящем исследовании рассматриваем и среднее значение, и моду  $G_{RP} - W3$ . Мода вычислена для ячеек пространства, содержащих по 400 звезд.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем исследовании пространственные вариации цвета  $G_{RP} - W3$  рассматриваются как результат: 1) покраснения звезд, 2) систематического линейного изменения  $\Delta(G_{RP} - W3)_0$  их нормального цвета  $(G_{RP} - W3)_0$  с координатой  $|Z|$  из-за изменения их возраста и металличности.

Решение для 19 искомым параметров представлено в табл. 1. Этот набор параметров соответствует минимальной сумме квадратов невязок, т.е. разностей между модельным и наблюдаемым цветом  $G_{RP} - W3$ .

Из имеющихся представлений о распределении пыли в галактических окрестностях Солнца и о поясе Гулда, а также учитывая прежние решения, для каждого искомого параметра задавался интервал



**Рис. 3.** Диаграмма ГР вида “ $(G_{\text{RP}} - W3) - M_{W3}$ ” для звезд выборки (а) до и (б) после учета покраснения  $E(G_{\text{RP}} - W3)$  и поглощения  $A_{W3}$ . Изохроны PARSEC и MIST для возраста 2 млрд лет и металличности  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.1$  показаны сплошной и пунктирной белыми кривыми соответственно. Справа дана шкала тонировки для распределения звезд в ячейках  $0.01 \times 0.01$  звездной величины.

приемлемых значений, который указан в табл. 1 (для удобства указаны обе зависимые друг от друга характеристики эллипса  $a$  и  $e$ , а также сумма шкал высот  $Z_A + \zeta_A$ ). Для каждого параметра внутри интервала принималась равномерная сетка из пяти значений параметра. Благодаря мощности современных компьютеров, решение искалось перебором значений каждого из 19 искомых параметров на заданной сетке (т.е. сумма квадратов невязок вычислялась для  $5^{19}$  наборов параметров). В результате для каждого параметра выбирались два значения, для которых сумма квадратов невязок минимальна. Внутри интервала между этими двумя значениями снова принималась равномерная сетка из 3–6 значений параметра. И вычисления (т.е. вторая итерация) повторялись на этой новой сетке. Для всех параметров понадобилось не более четырех итераций. С учетом вспомогательных вычислений всего рассмотрено около  $10^{14}$  наборов параметров.

Для некоторых параметров уже во второй итерации сумма квадратов невязок для всех значений сетки различалась не более чем на 0.2%. В качестве ошибки определения каждого параметра, указанной в табл. 1, принято такое его изменение, которое при прочих фиксированных параметрах дает изменение стандартного отклонения невязок не более, чем на 0.2%. Значения параметров, найденные с использованием индивидуальных  $G_{\text{RP}} - W3$  и  $mode(G_{\text{RP}} - W3)$ , совпали в пределах ошибок, указанных в табл. 1.

Отметим, что некоторые параметры вычислены с большой неопределенностью, так как их варьирование в сравнительно широких пределах почти не влияет на сумму квадратов невязок. Это также отмечено в прежних решениях (Гончаров, 2009б, 2012б) и объясняется особенностями модели. Например, угол  $\gamma$  между слоями пыли достаточно мал для того, чтобы в большой области пространства ( $b \approx 0^\circ$  и  $l \approx \pm 90^\circ$ ) два слоя пыли фактически вы-



**Таблица 1.** Рассматриваемые интервалы значений параметров модели и найденное решение

Параметр	Интервал	Решение
$\gamma, ^\circ$	14–26	$18 \pm 2$
$\theta, ^\circ$	–60–+60	$15 \pm 5$
$\eta, ^\circ$	–90–+90	$28 \pm 5$
$A, \text{пк}$	400–700	$600 \pm 50$
$e$	0.34–0.98	$0.95 \pm 0.02$
$a, \text{пк}$	80–668	$187 \pm 50$
$x_0, \text{пк}$	–160–+160	$+20 \pm 30$
$y_0, \text{пк}$	–160–+160	$-100 \pm 30$
$z_0, \text{пк}$	–50–+50	$+7 \pm 10$
$Z_0, \text{пк}$	–30–+30	$-10 \pm 5$
$Z_A, \text{пк}$	70–270	$170 \pm 40$
$\zeta_A, \text{пк}$	40–440	$170 \pm 40$
$Z_A + \zeta_A, \text{пк}$	110–710	$340 \pm 30$
$E0_{\text{equator}}, {}^m \text{кпк}^{-1}$	0.4–1.2	$0.59 \pm 0.05$
$E1_{\text{equator}}, {}^m \text{кпк}^{-1}$	0.0–0.6	$0.15 \pm 0.05$
$\Phi, ^\circ$	–90–+90	$40 \pm 10$
$E0_{\text{Gould}}, {}^m \text{кпк}^{-1}$	0.0–1.2	$0.48 \pm 0.05$
$E1_{\text{Gould}}, {}^m \text{кпк}^{-1}$	0.0–1.2	$0.26 \pm 0.05$
$\phi, ^\circ$	0–180	$120 \pm 15$
$(G_{\text{RP}} - W3)_0, {}^m$	1.40–1.52	$1.43 \pm 0.01$
$\Delta(G_{\text{RP}} - W3)_0, {}^m \text{кпк}^{-1}$	–0.08–0.00	$-0.020 \pm 0.007$

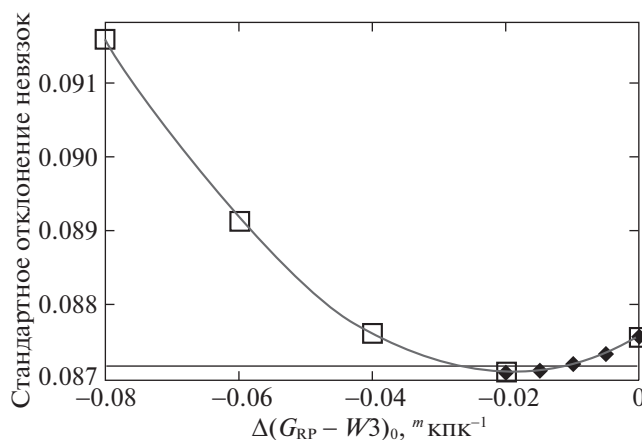
глядели как один. Поэтому вариации  $\gamma$  в сравнительно широких пределах  $18 \pm 2^\circ$  меняют сумму квадратов невязок менее, чем на 0.2%. Кроме того, найденное сравнительно большое покраснение вдали от плоскости Галактики при довольно малом покраснении около плоскости заставляет нас принять сравнительно большие шкалы высот слоев в соответствии с уравнениями (7) и (8). А так как угол  $\gamma$  мал, вдали от плоскости Галактики увеличение шкалы высот каждого слоя дает примерно одинаковый эффект. Поэтому уверенно определяется только сумма шкал высот слоев, в то время, как каждая шкала вычисляется с большой неопределенностью. Другими словами, шкалы высот частично зависят друг от друга: увеличивая одну, мы вынуждены примерно на столько же

уменьшить другую. В итоге приняты одинаковые шкалы высот для обоих слоев.

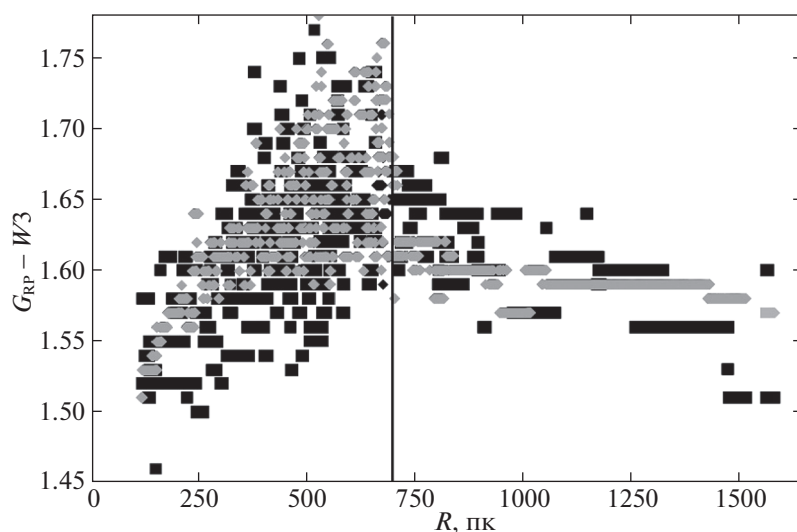
С большой неопределенностью вычислен также размер пылевого слоя в поясе Гулда, т.е.  $A$  и  $a$ , хотя эксцентриситет  $e$  (т.е. форма слоя) определяется уверенно. Причина этого в том, что внешняя граница слоя может быть определена только как район, где уменьшается пространственная плотность распределения пыли и соответственно *дифференциальное* межзвездное поглощение (измеряемое в звездных величинах на парсек). Но используемое нами в качестве данных изменение цвета звезд отражает не *дифференциальное*, а *кумулятивное* поглощение (от Солнца до звезды, измеряемое в звездных величинах). При удалении от Солнца (или центра слоя) кумулятивное покраснение/поглощение должно расти, а на границе слоя — стабилизироваться. Однако, учитывая естественные флуктуации пылевой среды и известный общий рост плотности распределения пыли в направлении центра Галактики, расстояние, на котором кумулятивное покраснение перестает расти, определяется неуверенно. Те же причины привели к большой неопределенности координат  $x_0$  и  $y_0$  центра пояса Гулда (кроме того, рост плотности распределения пыли в направлении центра Галактики может приводить к некоторому смещению оценки  $x_0$  в сторону центра). Вычислить дифференциальное покраснение по кумулятивному можно, только если пространственная плотность рассматриваемых точек (звезд) велика, и на каждом луче зрения есть несколько точек (звезд). Плотность распределения гигантов сгущения для этого недостаточна. Однако трехмерные карты покраснения Гончарова (2017а) и Лаллемент и др. (2018) имеют версии с дифференциальным покраснением и в будущем могут быть использованы для более точного определения размера пылевого слоя в поясе Гулда.

На рис. 4 серой кривой показан пример изменения стандартного отклонения невязок для моды  $G_{\text{RP}} - W3$  в зависимости от коэффициента  $\Delta(G_{\text{RP}} - W3)_0$  при фиксированных значениях остальных параметров из таблицы 1. Горизонтальная черная линия отмечает уровень 0.2% выше минимума. Вычисления для всего разнообразия остальных параметров выполнены на сетке значений  $\Delta(G_{\text{RP}} - W3)_0$ , отмеченных на рис. 4 большими пустыми квадратами в первой итерации и черными ромбами во второй итерации. Это один из случаев, когда уже после второй итерации очевидно решение:  $\Delta(G_{\text{RP}} - W3)_0 = -0.020 \pm 0.007$  звездной величины на кпк.

Насколько успешно модель объясняет пространственные вариации  $G_{\text{RP}} - W3$ , видно из рис. 5 и 6, где *mode*( $G_{\text{RP}} - W3$ ) показана в зависимости от  $R$  и  $l$  соответственно, на рис. 6 — для трех



**Рис. 4.** Стандартное отклонение невязок для моды  $G_{RP} - W3$  в зависимости от коэффициента  $\Delta(G_{RP} - W3)_0$  при фиксированных значениях остальных параметров из табл. 1 — серая кривая. Сетка значений в первой итерации — пустые квадраты, во второй итерации — черные ромбы. Горизонтальная черная линия отмечает уровень 0.2% выше минимума.

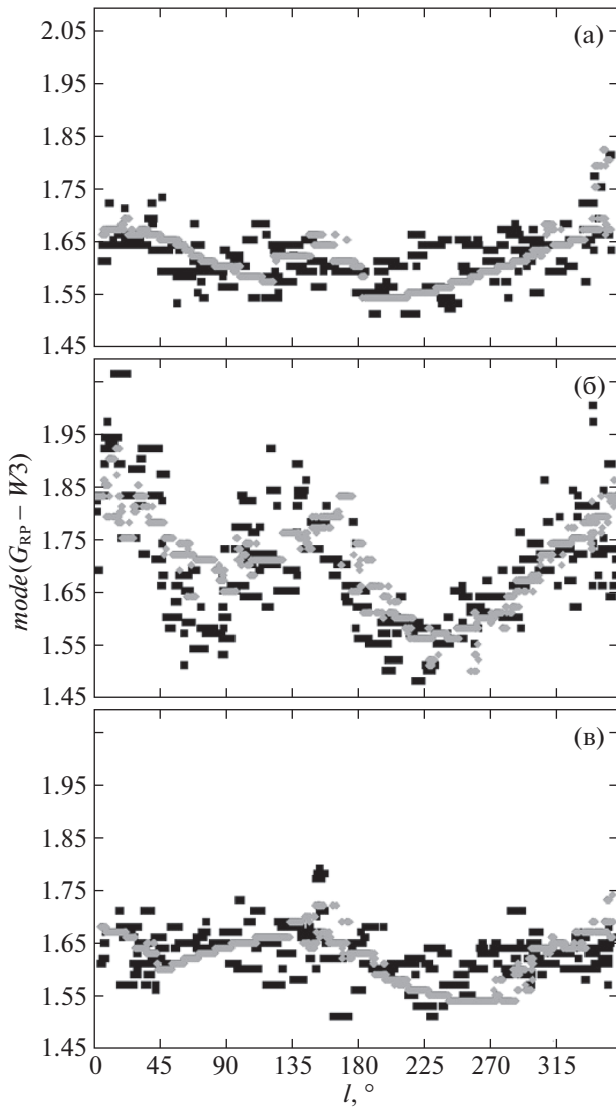


**Рис. 5.**  $Mode(G_{RP} - W3)$  в зависимости от  $R$ : исходные данные — черные квадраты, модель — серые ромбы. Вертикальной прямой отмечено  $R = 700$  пк.

слоев: (а)  $Z > 140$ , (б)  $-140 < Z < 140$ , (в)  $Z < -140$  пк. При этом исходные данные показаны черными квадратами, модель — серыми ромбами. Большой разброс данных вызван тем, что в данном случае моды вычислены по всему диапазону  $b$  и  $l$  на рис. 5 и по всему диапазону  $R$  на рис. 6. На рис. 5 вертикальная прямая отмечает  $R = 700$  пк, где виден резкий перелом зависимости. Он объясняется цилиндрической формой рассматриваемой области пространства. При  $R < 700$  и  $> 700$  пк в выборке преобладают соответственно звезды около плоскости Галактики вдали от Солнца и звезды вдали от плоскости ровно над и под Солнцем. Для первых важен учет больших покраснений, но почти не важно естественное изменение нормального цвета с  $Z$ , для вторых — наоборот. Модель хорошо

воспроизводит этот перелом около  $R = 700$  пк, доказывая свою надежность. На рис. 6 модель хорошо воспроизводит влияние пояса Гулда: два максимума покраснения при  $l \approx 0^\circ$  и  $155^\circ$ , преимущественно к северу и югу от галактической плоскости соответственно. Этот рисунок можно сравнить с рис. 2 в работе Гончарова (2009б).

Стандартное отклонение исходных значений  $G_{RP} - W3$  составило 0.22 звездной величины для отдельных звезд и 0.13 звездной величины — для моды цвета в ячейках пространства, содержащих по 400 звезд. Решение, представленное в табл. 1, дает стандартное отклонение невязок 0.186 и 0.087 звездной величины, соответственно для отдельных звезд и мод цвета. Для сравнения — аналогичные стандартные отклонения невязок при моделирова-



**Рис. 6.**  $Mode(G_{RP} - W3)$  в зависимости от галактической долготы  $l$  для слоев  $Z > 140$  пк (а),  $-140 < Z < 140$  пк (б),  $Z < -140$  пк (в). Исходные данные — черные квадраты, модель — серые ромбы.

нии тех же данных одним слоем с барометрическим распределением пыли без зависимости покраснения от долготы оказались заметно больше — 0.2 и 0.1 звездной величины соответственно. Таким образом, полученное решение наилучшим образом объясняет существенную часть разброса наблюдаемых  $G_{RP} - W3$ . Это видно и на рис. 3.

Как отмечено ранее, подавляющее большинство звезд выборки находятся довольно близко к плоскости Галактики. Поэтому предсказанные TRILEGAL медианы возраста и металличности звезд выборки почти не отличаются от таковых для звезд около плоскости Галактики — 2 млрд лет и  $[Fe/H] = -0.1$ , если принять градиенты возраста Касагранде и др. (2016) и металличности Субирон и

др. (2008) и Гончарова (2016а). Теоретические изохроны PARSEC и MIST для 2 млрд лет и  $[Fe/H] = -0.1$  показаны на рис. 3 (б) на фоне диаграммы ГР для рассматриваемой выборки после учета найденного покраснения  $E(G_{RP} - W3)$  и поглощения  $A_{W3}$  по закону поглощения CCM89. Использовалась версия PARSEC 1.2S+COLIBRI S35 с опциями по умолчанию, включая потерю массы на ветви гигантов  $\eta_{Reimers} = 0.2$ , и версия MIST 1.2 с вращением звезд со скоростью 0.4 от критической. Гончаров, Мосенков (2017а) показали, что вращение совершенно не влияет на изохроны в области сгущения гигантов. Видно, что мода распределения звезд одинаково хорошо согласуется с изохронами PARSEC и MIST с учетом того, что разногласие между изохронами можно приписать несовершенству изохрон на уровне в несколько сотых долей звездной величины (см. обсуждение Гончарова и др., 2019).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Отметим некоторые особенности пространственного распределения пыли, которые следуют из найденного решения. Как ожидалось, направление максимального покраснения в экваториальном слое (с  $l = 90^\circ - \Phi = 50^\circ$ ) попадает в первый галактический квадрант; пояс Гулда ориентирован так, что его большая полуось (с  $l \approx \phi - \theta + \eta - 90^\circ = 43^\circ$ ) попадает в первый галактический квадрант; направление максимального покраснения в поясе Гулда (с  $l \approx \phi - \theta - 90^\circ = 15^\circ$ ) примерно соответствует направлению на крупный комплекс облаков в Скорпионе—Змееносце—Стрельце. Кроме того, большой эксцентриситет ( $e = 0.95$ ) эллипса основной плоскости пояса Гулда говорит о том, что основная часть пыли в поясе содержится всего лишь в двух районах с  $-30^\circ < l < +30^\circ$  и  $135^\circ < l < 180^\circ$  (что видно и на рис. 6).

Найденное положение центра пояса Гулда во втором квадранте ( $-x_0 = -20$ ,  $-y_0 = 100$ ,  $-z_0 = -7$  пк) на расстоянии 102 пк от Солнца несколько отличается от полученных ранее значений (см. обзор Бобылева, 2014). Возможно, как отмечено ранее, найденное значение  $x_0$  смещено относительно истинного из-за большего покраснения в направлении центра Галактики. Кроме того, распределение пыли в поясе может отличаться от распределения молодых звезд, по которому обычно определяется положение Солнца относительно центра пояса. По этой же причине могут отличаться от общепринятых шкал высот для молодых объектов Галактики, представленных, например, Гончаровым (2012в) и Бобылевым, Байковой (2016а,б), и найденные в настоящем исследовании сравнительно большие шкалы высот пылевых слоев (или шкала

высот единого пылевого слоя в тех районах, где слои плохо разделяются). Эти оценки примерно вдвое больше, чем в прежних решениях по рассматриваемой модели. Видимо, прежде толщина слоя (слоев) недооценивалась из-за нехватки звезд с большими  $|Z|$ . Полученная здесь оценка предпочтительнее, так как она основана на выборке звезд, гораздо более протяженной в направлении оси  $Z$  и впервые заведомо перекрывающей всю толщину слоя (слоев) пыли. Важно, что найденные значения согласуются с упомянутой во Введении прямой осью Коса и др. (2014) для длинноволнового излучения и крупной пыли и, таким образом, подтверждают изложенную во Введении гипотезу о том, что пылинки большего размера встречаются дальше от плоскости Галактики.

Эта гипотеза подтверждается и найденным в настоящем исследовании довольно большим средним или медианным покраснением  $E(G_{\text{RP}} - W3) = 0.16 \pm 0.02$  звездной величины для областей с  $|Z| > 600$  пк (т.е. сквозь весь полуслой пыли выше или ниже Солнца). С законом поглощения ССМ89 это дает  $E(B - V) = 0.08 \pm 0.01$ , что заметно превышает наиболее вероятную оценку в диапазоне  $0.04 < E(B - V) < 0.06$  (Гончаров, Мосенков, 2018). По одному рассмотренному здесь показателю цвета нельзя сделать выводы о фактическом законе поглощения и его пространственных вариациях. В будущем для этого планируется использовать многополосную фотометрию. Однако для объяснения данного противоречия, чтобы получить оценку  $E(B - V) = 0.06$  сквозь галактический полуслой пыли, можно допустить в высоких широтах закон поглощения с  $A_{G_{\text{RP}}} = 2.67E(B - V)$ , что обеспечивается, например, законом поглощения ССМ89 с  $A_V/E(B - V) = 3.9$  вместо 3.1.

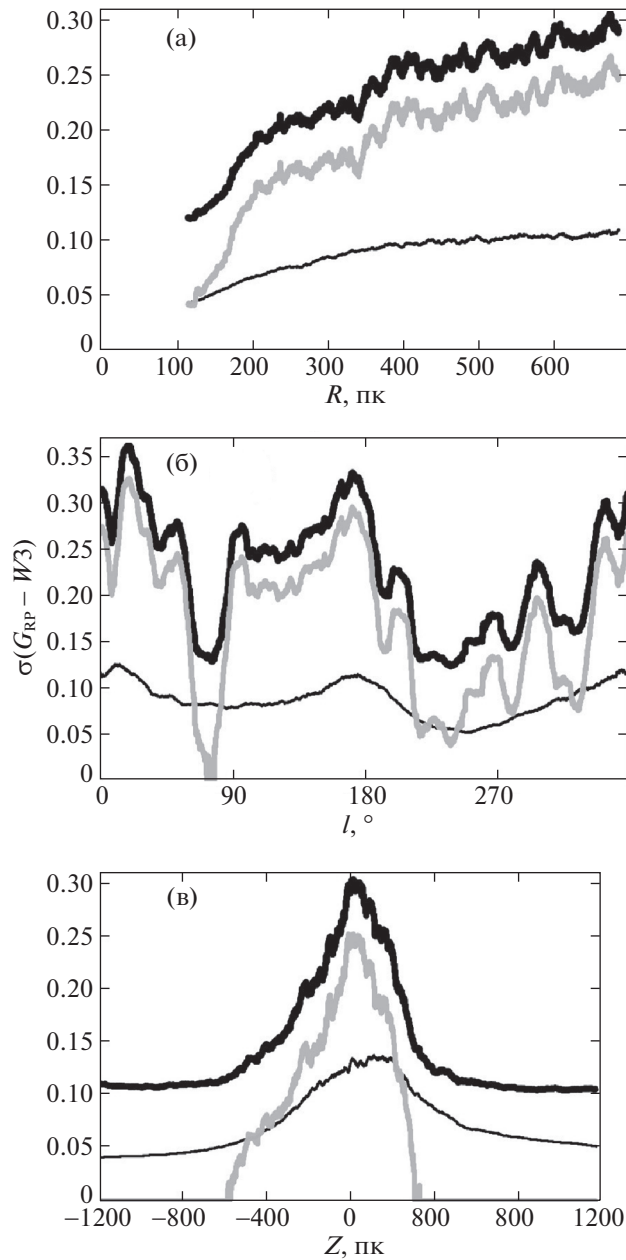
### ФЛУКТУАЦИИ ПЫЛЕВОЙ СРЕДЫ

Наблюдаемый разброс цвета  $G_{\text{RP}} - W3$  звезд рассматриваемой выборки включает в себя: 1) разброс из-за покраснения, предсказываемого моделью, включая разброс из-за изменения  $(G_{\text{RP}} - W3)_0$  с  $|Z|$ ; 2) разброс из-за мелкомасштабных отклонений покраснения от предсказанного моделью (т.е. упомянутых во Введении флуктуаций пылевой среды поперек луча зрения); 3) естественный разброс цвета для гигантов сгущения; 4) естественный разброс цвета для гигантов ветви. Таким образом, полученные невязки включают в себя разброс из пунктов (2)–(4). Современные модели Галактики позволяют оценить нормальный цвет  $(G_{\text{RP}} - W3)_0$  и его разброс для звезд нашей выборки, как полной выборки гигантов определенного цвета в определенном пространстве. TRILEGAL дает для

нашей выборки 80 и 20% гигантов сгущения и ветви соответственно, а распределение их по цвету хорошо аппроксимируется гауссианами со средними значениями и стандартными отклонениями  $1.42 \pm 0.1$  и  $1.55 \pm 0.1$  соответственно. Если учесть эти гауссианы вместе с разбросом из-за покраснения по модели, то остаточный разброс говорит об ожидаемых мелкомасштабных отклонениях индивидуальных покраснений звезд от предсказанных моделью значений.

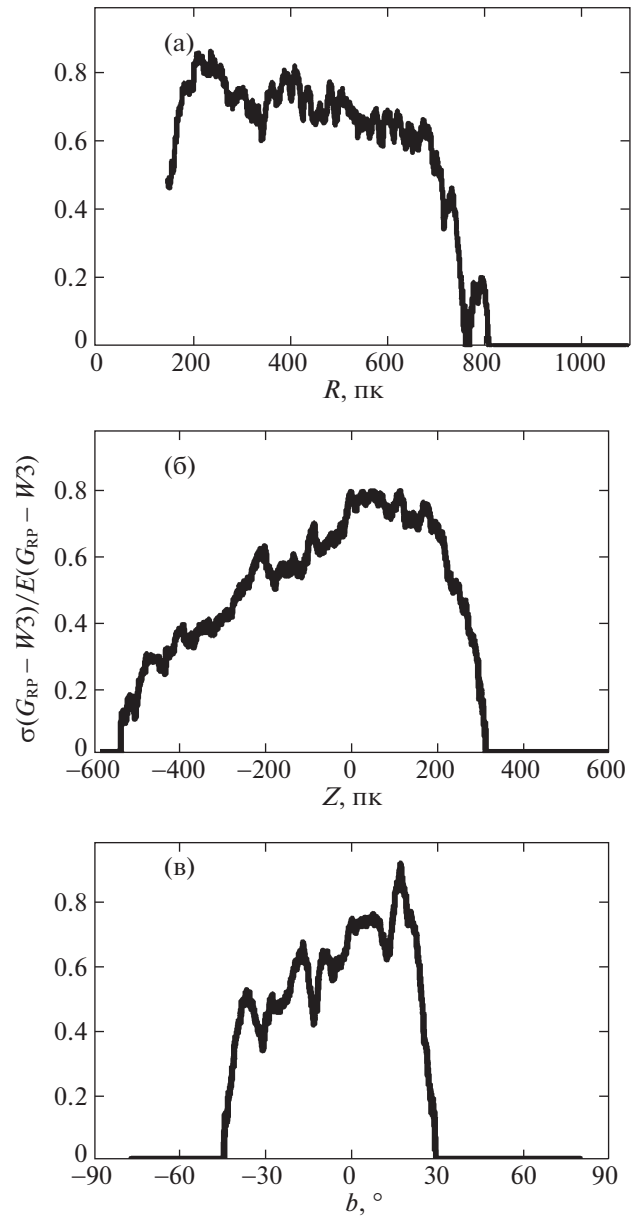
На рис. 7 показаны стандартные отклонения  $\sigma(G_{\text{RP}} - W3)$  исходных данных (толстая черная кривая), покраснения по модели (тонкая черная кривая) и остаточных флуктуаций после учета модели и дисперсии нормального цвета звезд (серая кривая) в зависимости от (а)  $R$ , (б)  $l$  для слоя  $|Z| < 140$  пк, (в)  $Z$ . Как и ожидалось, модель дает сглаженную оценку флуктуаций среды, описывая только их часть. Флуктуации среды особенно велики около плоскости Галактики ( $|Z| < 350$  пк) при  $R > 200$  пк. Вблизи Солнца и вдали от плоскости Галактики модель в совокупности с естественным разбросом нормального цвета звезд объясняют весь или почти весь наблюдаемый разброс гигантов по цвету.

На рис. 8 показано отношение стандартного отклонения остаточных флуктуаций  $\sigma(G_{\text{RP}} - W3)$  (после учета модели и естественного разброса нормальных цветов) к медиане покраснения  $E(G_{\text{RP}} - W3)$ , найденного по модели, в зависимости от (а)  $R$ , (б)  $Z$ , (в)  $b$ . Это отношение говорит о случайной относительной ошибке оценок по модели. Видно, что около плоскости Галактики вдали от Солнца эта величина близка к 80%, а при  $|Z| > 400$  пк падает до 20% и даже меньше (резкое падение при  $R > 700$  пк объясняется цилиндрической формой рассматриваемого пространства). Большее значение к северу, чем к югу, от плоскости Галактики объясняется ориентацией пояса Гулда (поднимается к северу от плоскости на долготах центра Галактики) в совокупности с общим ростом флуктуаций в направлении центра Галактики. Естественно, фактически это отношение не может упасть до нуля, т.е. модель не может давать совершенно точные предсказания. Несовершенство модели проявляется в асимметрии невязок между северным и южным полушариями, в ненулевых средних невязках в некоторых областях пространства и т.д. В итоге можно оценить, что вблизи Солнца и в высоких широтах модель предсказывает покраснение  $E(G_{\text{RP}} - W3)$  с точностью 0.02 звездной величины, или покраснение  $E(B - V)$  с точностью 0.01 звездной величины в соответствии с законом поглощения ССМ89. Это довольно высокая точность по сравнению с типичной для других карт и моделей покраснения ошибкой в высоких широтах



**Рис. 7.** Стандартное отклонение  $\sigma(G_{RP} - W3)$  исходных данных (толстая черная кривая), покраснения по модели (тонкая черная кривая) и остаточных флуктуаций после учета модели и дисперсии нормального цвета звезд (серая кривая) в зависимости от  $R$  (а),  $l$  (б) для слоя  $|Z| < 140$  пк,  $Z$  (в).

$\sigma(E(B - V)) > 0.02$  (Гончаров, Мосенков, 2019). Вообще, предлагаемая модель дает сравнимые по точности или более точные в случайном отношении оценки, нежели другие карты и модели в областях, где рассматриваемое на рис. 8 отношение меньше 50%. Видно, что это области с  $R < 200$  пк, а также —  $|b| > 25^\circ$ . Наихудшие же предсказания модели при флуктуациях 80%, например, для медианного значения покраснения в рассматриваемом



**Рис. 8.** Отношение стандартного отклонения остаточных флуктуаций  $\sigma(G_{RP} - W3)$  к медиане найденного покраснения  $E(G_{RP} - W3)$  в зависимости от  $R$  (а),  $Z$  (б),  $b$  (в).

пространстве выглядят как  $E(G_{RP} - W3) = 0.22 \pm \pm 0.18$ . При таком балансе предпочтительнее прямые оценки покраснения конкретной звезды на основе ее фотометрии или спектроскопии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании вычислены параметры новой усложненной версии трехмерной модели пространственного распределения пыли в галактических окрестностях Солнца с целью уточнения свойств галактического слоя пыли. Для этого

использована выборка 93 992 гигантов сгущения с незначительной примесью гигантов ветви с точными параллаксами и фотометрией из Gaia DR2. Эта выборка полна в пространственном цилиндре радиусом 700 пк вокруг Солнца, протянувшаяся до  $|Z| < 1800$  пк. Таким образом, это первая в астрономии выборка звезд, которая полна во всем пространстве поперек слоя пыли в галактических окрестностях Солнца.

Пространственные вариации цвета  $G_{RP}-W3$  звезд выборки на основе фотометрии в полосах Gaia DR2  $G_{RP}$  и WISE  $W3$  объясняются покраснением звезд и линейным в зависимости от  $|Z|$  изменением их нормального цвета. Это позволило вычислить 19 параметров модели, впервые предложенной Гончаровым (2009а,б). Как и в прежней версии, модель предполагает два слоя пыли, вдоль экватора Галактики и в поясе Гулда, которые пересекаются вблизи Солнца под углом 18 градусов. В отличие от прежней, новая версия модели рассматривает слой пояса Гулда как эллипс с большой полуосью 600 пк и эксцентриситетом 0.95, децентрированный относительно Солнца. Для обоих слоев пыли найдена шкала высот  $170 \pm \pm 40$  пк.

Для гигантов вдали от плоскости Галактики ( $|Z| > 600$  пк, т.е. заведомо за полуслоями пыли к северу и югу от Солнца) найдено довольно большое покраснение  $E(G_{RP} - W3) = 0.16 \pm 0.02$  сквозь половину галактического слоя пыли. Это можно объяснить, приняв в высоких широтах закон поглощения Карделли и др. (1989) с отношением  $A_V/E(B - V) = 3.9$  вместо 3.1.

Для сгущения гигантов вблизи Солнца вычислены моды абсолютной величины  $M_{W3} = -1.70 \pm \pm 0.02$  и нормального цвета  $(G_{RP} - W3)_0 = (1.43 \pm \pm 0.01) - (0.020 \pm 0.007)|Z|$ , где  $Z$  выражена в килопарсеках. Эти оценки согласуются с оценками по теоретическим изохронам PARSEC и MIST для выборки, в которой преобладают гиганты возрастом 2 млрд лет и металличностью  $[Fe/H] = -0.1$  в согласии с моделью звездного населения TRILEGAL.

Сопоставление дисперсий наблюдаемого цвета звезд выборки, покраснения по модели и нормального цвета гигантов сгущения и ветви позволило остаточную дисперсию рассмотреть как естественные мелкомасштабные флуктуации плотности пылевой среды относительно среднего покраснения, вычисляемого по модели. Из-за этих флуктуаций покраснение конкретной звезды в определенной точке пространства может отличаться от модельного покраснения на случайную величину, которая уменьшается с 80 до  $<20\%$  от величины модельного покраснения при переходе от низких широт вдали от Солнца к остальному пространству. Это значит,

что вблизи Солнца ( $R < 200$  пк) и в средних и высоких широтах ( $|b| > 25^\circ$ ) предлагаемая модель находится на уровне точности лучших карт и моделей покраснения или превосходит их. В остальном пространстве модель, как и другие карты и модели, не может учесть большие по амплитуде мелкомасштабные флуктуации пылевой среды и, таким образом, уступает прямым измерениям покраснения конкретной звезды по ее фотометрии и спектроскопии.

Благодарю рецензентов за полезные замечания. Благодарю Антона Дрянчикина за предоставление компьютерных ресурсов. В этом исследовании использованы ресурсы Страсбургского центра астрономических данных (<http://cdsweb.u-strasbg.fr>), включая базу данных SIMBAD и сервис X-Match; сервис TRILEGAL (<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/trilegal>) и сервисы вычисления изохрон PARSEC (<http://stev.oapd.inaf.it/cmd>) и MIST (<http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>). В этой публикации используются данные космического телескопа Wide-field Infrared Survey Explorer (<http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/wise.html>), который является совместным проектом Университета Калифорнии (Лос Анжелес) и Лаборатории реактивного движения Калифорнийского института технологии. Эта работа использует данные миссии Gaia Европейского Космического агентства (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные Консорциумом Обработки и Анализа Данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арену и др. (F. Arenou, M. Grenon, and A. Gómez), *Astron. Astrophys.* **258**, 104 (1992).
2. Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, G. Mantelet, and R. Andrae), *Astron. J.* **156**, 58 (2018).
3. Бобылев В.В., *Астрофизика* **57**, 625 (2014) [*V.V. Bobylev, Astrophysics*, **57**, 583 (2014)].
4. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 3 (2016а) [*V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett.* **42**, 1 (2016а)].
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 210 (2016б) [*V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett.* **42**, 182 (2016б)].
6. Брессан и др. (A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427**, 127 (2012).
7. Вайнгартнер, Дрэйн (J.C. Weingartner and B.T. Draine), *Astrophys. J.* **548**, 296 (2001).
8. Вержели и др. (J.-L. Vergely, R. Freire Ferrero, D. Egret, and J. Köppen), *Astron. Astrophys.* **340**, 543 (1998).

9. Гая (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A1 (2018a).
10. Гая (Gaia Collaboration, D.W. Evans, M. Riello, F. De Angeli, J. M. Carrasco, P. Montegriffo, C. Fabricius, C. Jordi, L. Palaversa, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A4 (2018b).
11. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **34**, 868 (2008) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **34**, 785 (2008)].
12. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **35**, 707 (2009a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **35**, 638 (2009a)].
13. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **35**, 862 (2009b) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **35**, 780 (2009b)].
14. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **38**, 15 (2012a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 12 (2012a)].
15. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **38**, 108 (2012b) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 87 (2012b)].
16. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **38**, 776 (2012в) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 694 (2012c)].
17. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **39**, 102 (2013a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **39**, 83 (2013a)].
18. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **39**, 620 (2013б) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **39**, 550 (2013b)].
19. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **42**, 494 (2016a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **42**, 445 (2016a)].
20. Гончаров Г.А., *Астрофизика* **59**, 617 (2016б) [G. A. Gontcharov, *Astrophysics*, **59**, 548 (2016b)].
21. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **43**, 521 (2017a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **43**, 472 (2017a)].
22. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **43**, 601 (2017б) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **43**, 545 (2017b)].
23. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **470**, L97 (2017a).
24. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **472**, 3805 (2017b).
25. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **475**, 1121 (2018).
26. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **483**, 299 (2019).
27. Гончаров и др. (G.A. Gontcharov, A.V. Mosenkov, and M.Yu. Khovritchev), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **483**, 4949 (2019).
28. Грин и др. (G.M. Green, E.F. Schlafly, D.P. Finkbeiner, H.-W. Rix, N. Martin, W. Burgett, P.W. Draper, H. Flewelling, K. Hodapp, et al.), *Astrophys. J.* **810**, 25 (2015).
29. Грин и др. (G.M. Green, E.F. Schlafly, D.P. Finkbeiner, H.-W. Rix, N. Martin, W. Burgett, P.W. Draper, H. Flewelling, K. Hodapp, et al.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **478**, 651 (2018).
30. Доттер и др. (A. Dotter, B. Chaboyer, D. Jevremović, E. Baron, J. W. Ferguson, A. Sarajedini, and J. Anderson), *Astron. J.* **134**, 376 (2007).
31. Доттер (A. Dotter), *Astrophys. J. Supp. Ser.* **222**, 8 (2016).
32. Дриммель, Шпергель (R. Drimmel and D.N. Spergel), *Astrophys. J.* **556**, 181 (2001).
33. Дриммель и др. (R. Drimmel, A. Cabrera-Lavers, and M. López-Corredoira), *Astron. Astrophys.* **409**, 205 (2003).
34. Жирарди и др. (L. Girardi, M.A.T. Groenewegen, E. Hatziminaoglou, L. da Costa), *Astron. Astrophys.* **436**, 895, (2005).
35. Жирарди (L. Girardi), *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 95 (2016).
36. Карделли и др. (J.A. Cardelli, G.C. Clayton, and J.S. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
37. Касагранде и др. (L. Casagrande, V. Silva Aguirre, K.J. Schlesinger, D. Stello, D. Huber, A.M. Serenelli, R. Schönrich, S. Cassisi, A. Pietrinferni, et al.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **455**, 987 (2016).
38. Кос и др. (J. Kos, T. Zwitter, R. Wyse, O. Bienaymé, J. Binney, J. Bland-Hawthorn, K. Freeman, B.K. Gibson, G. Gilmore, et al.), *Science* **345**, 791 (2014).
39. Лаллемент и др. (R. Lallement, L. Capitanio, L. Ruiz-Dern, C. Danielski, C. Babusiaux, J.L. Vergely, M. Elyajouri, F. Arenou, and N. Leclerc), *Astron. Astrophys.* **616**, A132 (2018).
40. Майснер, Финкбайнер (A.M. Meisner and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **798**, 88 (2015).
41. Михалик и др. (D. Michalik, L. Lindgren, and D. Hobbs), *Astron. Astrophys.* **574**, A115 (2015).
42. Пакстон и др. (B. Paxton, L. Bildsten, A. Dotter, F. Herwig, P. Lesaffre, and F. Timmes), *Astrophys. J. Supp. Ser.* **192**, 3 (2011).
43. Паренаго П.П., *Курс звездной астрономии* (М.: ГИТТЛ, 1954).
44. Перриман (M. Perryman), *Astronomical Applications of Astrometry* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2009).
45. Петринферни и др. (A. Pietrinferni, S. Cassisi, M. Salaris, and F. Castelli), *Astrophys. J.* **612**, 168 (2004).
46. Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, J.D. Kirkpatrick, D. Padgett, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
47. Робин и др. (A.C. Robin, C. Reylé, S. Derrière, and S. Picaud), *Astron. Astrophys.* **409**, 523 (2003).

48. Скрутские и др. (M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M.D. Weinberg, S. Schneider, J.M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, et al.), *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
49. Спада и др. (F. Spada, P. Demarque, Y.-C. Kim, T.S. Boyajian, and J.M. Brewer), *Astrophys. J.* **838**, 161 (2017).
50. Субирон и др. (C. Soubiran, O. Bienaymé, T.V. Mishenina, and V.V. Kovtyukh), *Astron. Astrophys.* **480**, 91 (2008).
51. Уэлш и др. (B.Y. Welsh, R. Lallement, J.L. Vergely, and S. Raimond), *Astron. Astrophys.* **510**, A54 (2010).
52. Хег и др. (E. Høg, C. Fabricius, V.V. Makarov, S. Urban, T. Corbin, G. Wycoff, U. Bastian, P. Schwekendiek, and A. Wicenec), *Astron. Astrophys.* **355**, L27 (2000).
53. Чекай и др. (M.A. Czekaj, A.C. Robin, F. Figueras, X. Luri, and M. Haywood), *Astron. Astrophys.* **564**, A102 (2014).
54. Чой и др. (J. Choi, A. Dotter, C. Conroy, M. Cantiello, B. Paxton, and B.D. Johnson), *Astrophys. J.* **823**, 102 (2016).
55. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkbeiner, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
56. Юрич и др. (M. Jurić, Z. Ivezić, A. Brooks, R.H. Lupton, D. Schlegel, D. Finkbeiner, N. Padmanabhan, N. Bond, B. Sesar, et al.), *Astrophys. J.* **673**, 864 (2008).