

НОВЫЕ КАРТЫ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ GAIA И ДРУГИХ ОБЗОРОВ НЕБА

© 2023 г. Г. А. Гончаров^{1*}, А. А. Марчук^{1,2}, М. Ю. Ховричев^{1,2}, А. В. Мосенков^{3,1}, С. С. Савченко^{1,2,4}, В. Б. Ильин^{1,2,5}, Д. М. Поляков^{1,2}, А. А. Смирнов^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Department of Physics and Astronomy, Brigham Young University, Provo, USA

⁴Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет Аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.; принята к публикации 20.10.2023 г.

Представлены новые трехмерные карты межзвездного поглощения в фильтрах V и Gaia G в радиусе 2 кпк от Солнца, трехмерная карта дифференциального поглощения (пространственной плотности распределения пыли) вдоль лучей зрения в том же пространстве, трехмерная карта вариаций соотношения поглощений в фильтрах V и Gaia G в радиусе 800 пк от Солнца и двумерная карта полного галактического поглощения сквозь весь полуслой пыли от Солнца до внегалактического пространства для галактических широт $|b| > 13^\circ$. Трехмерные карты имеют поперечное разрешение от 3.6 до 11.6 пк и радиальное разрешение 50 пк. Двумерная карта имеет угловое разрешение 6.1 угловой минуты. Эти карты получены на основе параллаксов Gaia DR3 и фотометрии Gaia, Pan-STARRS1, SkyMapper, 2MASS и WISE для примерно 100 миллионов звезд. Мы уделили особое внимание пространству в пределах 200 пк от Солнца и высоким галактическим широтам, как областям, где оценки поглощения до сих пор имели большую относительную неопределенность. Наши карты оценивают поглощение внутри галактического слоя пыли от Солнца до протяженного объекта или сквозь весь полуслой пыли от Солнца до внегалактического пространства с точностью около $\sigma(A_V) = 0.06$ звездной величины. Это дает высокую относительную точность оценок поглощения даже в высоких галактических широтах, где медианное полное галактическое поглощение сквозь весь полуслой пыли от Солнца до внегалактических объектов по нашим оценкам составляет $A_V = 0.12 \pm \pm 0.06$ звездной величины. Мы показали, что представленные карты являются одними из лучших по объему использованных данных, размеру рассматриваемого пространства, разрешению, точности и другим свойствам.

Ключевые слова: галактические окрестности Солнца; межзвездное поглощение; местная межзвездная среда.

DOI: 10.31857/S0320010823110025, **EDN:** NPYSFY

ВВЕДЕНИЕ

Пространственное распределение пыли, соответствующее покраснение звезд и межзвездное поглощение важны для понимания строения и эволюции нашей Галактики и внегалактических объектов. Покраснение звезды или межзвездное поглощение между наблюдателем и звездой точнее всего определяется из ее спектрального распределения энергии на основе фотометрических, спектральных и иных наблюдений. Таким способом

современные данные и методы позволяют достаточно точно определить индивидуальные покраснения/поглощения только для меньшинства звезд, к которому не принадлежат, например, многие неодионые, пекулярные или слишком тусклые звезды. Кроме того, значительную неопределенность в такие результаты вносит ошибка расстояния до звезды. В результате современные каталоги с оценками покраснения/поглощения отдельных звезд весьма ограничены как в точности этих оценок, так и в полноте представления звезд в какой-либо области пространства.

*Электронный адрес: georgegontcharov@yahoo.com

Например, используемый нами в настоящем исследовании массив данных Андерса и др. (2022, далее — АКQ22)¹ получен из анализа спектрального распределения энергии по данным проекта Gaia и других обзоров неба и содержит, кроме прочего, индивидуальные оценки поглощения для множества звезд. При этом в радиусе 2.5 кпк от Солнца оценки АКQ22 получены для примерно 100 миллионов звезд из общего числа порядка 10 миллиардов звезд в этом пространстве (Жирарди и др., 2005). Естественно, с удалением от Солнца доля звезд с измеренными индивидуальными покраснениями/поглощениями уменьшается.

АКQ22 использовали параллаксы и фотометрию из Gaia Early Data Release 3 (EDR3; Гайя, 2021a) совместно с фотометрией из Two Micron All-Sky Survey (2MASS; Скрутские и др., 2006), Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE; Райт и др. 2010), Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System Data Release I (Pan-STARRS, PS1; Чамберс и др. 2016), и SkyMapper Southern Sky Survey DR2 (SMSS, SMSS DR2; Онкен и др. 2019) для получения сравнительно точных индивидуальных оценок расстояния R и поглощений A_V , A_G , A_{BP} и A_{RP} в фильтрах V и Gaia G , BP , RP соответственно. Типичная точность оценок поглощения из АКQ22 составляет $\sigma(A_V) = 0.15$ для ярких и 0.20 для слабых звезд. Примерно такова она и в других лучших источниках индивидуальных оценок, например, в результатах Берри и др. (2012). Учитывая, что само поглощение вблизи Солнца² и в высоких широтах весьма мало (например, по недавним оценкам консорциума Гайя (2023, далее — TGE от сокращения Total Galactic Extinction, принятого консорциумом Гайя), медианное полное галактическое поглощение сквозь весь полуслой пыли в направлении галактических полюсов при $|b| > 80^\circ$ составляет $A_V \approx 0.08 \pm 0.06$), видно, что индивидуальное поглощение звезд вблизи Солнца и в высоких широтах, как правило, известно с неопределенностью более 100%.

Поэтому, несмотря на рост числа звезд с индивидуальными оценками покраснения/поглощения, остаются актуальными оценки из карт покраснения/поглощения, которые могут быть точнее индивидуальных оценок.

Трехмерная карта покраснения/поглощения является таблицей, представляющей покраснение или поглощение в зависимости от галактической долготы l , широты b и расстояния R от Солнца либо от прямоугольных галактических координат XYZ .³ Оценки в карте, как правило, получаются путем анализа, осреднения и сглаживания индивидуальных оценок для звезд в некотором пространстве. Оценка на основе карты может быть получена для любого объекта путем интерполирования оценок из соседних с ним ячеек карты. Таким образом, карта дает оценку покраснения/поглощения для любого объекта на основе оценок для окружающих его звезд и сглаживания естественных флуктуаций пылевой среды от звезды к звезде. Такие флуктуации проявляются на масштабе более 0.1 пк и имеют типичное стандартное отклонение от $\sigma(A_V) = 0.06$ в высоких широтах до $\sigma(A_V) = 0.33$ около галактического экватора, как обсуждалось, например, Грином и др. (2015), Гончаровым (2019), Панопулу и др. (2022) и Гончаровым и др. (2022).

Среди недавних трехмерных карт, основанных на результатах Gaia, но полученных разными методами, отметим карты Гончарова (2017, далее — G17),⁴ Грина и др. (2019, далее — GSZ19),⁵ Гуо и др. (2021, далее — GCY21) и Лаллемент и др. (2022, далее — LVB22).

На основе трехмерных карт кумулятивного покраснения/поглощения между наблюдателем и точкой пространства создаются трехмерные карты дифференциального покраснения/поглощения вдоль луча зрения в пересчете на единицу расстояния. Фактически они представляют вариации пространственной плотности распределения пыли.

Кроме трехмерных карт, используются двумерные карты с оценками полного галактического покраснения/поглощения сквозь весь полуслой пыли от Солнца до внегалактического пространства, т.е. в зависимости только от l и b . Такие двумерные карты полезны как источник оценок покраснения/поглощения для внегалактических объектов или для калибровки и проверки трехмерных карт, в которых кумулятивное покраснение/поглощение вдоль луча зрения должно равняться полному галактическому покраснению/поглощению. Именно оценки из двумерных

¹ <https://data.aip.de/projects/starhorse2021.html> или <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/I/354>

² Здесь и далее под областью вблизи Солнца мы подразумеваем область радиусом примерно 200 пк вокруг него как пространство, где типичная неопределенность поглощения сравнима с самой величиной поглощения, а недостаточное число звезд не позволяет применить многие методы определения покраснения/поглощения, например, метод Грина и др. (2019).

³ Мы рассматриваем галактическую прямоугольную систему координат с центром в Солнце и осями X , Y и Z , направленными в сторону центра Галактики, в сторону ее вращения и в сторону ее северного полюса соответственно. Примеры карт кумулятивного и дифференциального покраснения/поглощения в зависимости от XYZ — карты Гончарова (2017) и Лаллемент и др. (2022) соответственно.

⁴ <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/PAZh/43/521>

⁵ <http://argonaut.skymaps.info/>

карт чаще всего используются как оценки галактического покраснения/поглощения в наиболее популярных базах данных внегалактических объектов, таких как NASA/IPAC Extragalactic Database (NED; <https://ned.ipac.caltech.edu>). Наиболее популярны двумерные карты Шлегеля и др. (1998, далее — SFD98) по данным космических обсерваторий Cosmic Background Explorer (COBE) и Infrared Astronomical Satellite (IRAS) и Шлафли, Финкбайнера (2011, далее — SF11) по тем же данным, но с другой калибровкой — обе используются в NED, а также карта Майснера, Финкбайнера (MF15; 2015) по данным космической обсерватории Planck. Эти двумерные карты получены на основе оценок полной эмиссии пыли в инфракрасном (ИК) диапазоне на всем луче зрения с последующим исключением эмиссии внутри Солнечной системы и вне Галактики и калибровкой покраснение—эмиссия.

На современном уровне развития астрономии карты покраснения/поглощения нужны, во-первых, как источник оценок для многочисленных объектов, вообще не имеющих оценок. При этом для протяженных объектов (звездных скоплений, ассоциаций, межзвездных облаков, галактик, небольших областей пространства и т.п.) оценки карт особенно точны за счет сглаживания естественных флуктуаций пылевой среды. Отметим, что в последние годы открываются сотни новых рассеянных скоплений и других протяженных объектов, представленных, например, в каталогах Кантат-Годэна и др. (2020) и Хант, Рефферт (2023). Во-вторых, карты покраснения/поглощения полезны тем, что помогают обнаружить и учесть систематические ошибки индивидуальных оценок, как показано нами далее на примере зависимости оценок AKQ22 от расстояния. В-третьих, трехмерные карты нужны для калибровки наблюдаемых величин (например, ИК-эмиссии) при создании двумерных карт (которые, в свою очередь, служат для тестирования новых трехмерных карт).

Отметим, что, зная типичную величину флуктуаций среды, типичную ошибку современной карты и типичную точность индивидуального поглощения в современных исследованиях, можно оценить, где лучше предсказания карт для точечного объекта, а где — индивидуальные оценки для него. Например, типичная ошибка индивидуального поглощения $\sigma(A_V) = 0.18$ в AKQ22 больше типичной суммы ошибки карты и флуктуаций среды в тех областях, где флуктуации малы, а именно, где они составляют $\sigma(A_V) < (0.18^2 - 0.08^2)^{0.5} = 0.16$. Это выполняется вблизи галактических полюсов, примерно при $|b| > 60^\circ$ (Гончаров и др., 2022), где оценки карт особенно полезны. На большей части неба, при $|b| < 60^\circ$, типичные современные

индивидуальные оценки поглощения для точечных объектов точнее, чем предсказания современных карт.

Обзор и сравнение многих двумерных и трехмерных карт с оценкой их достоинств и недостатков даны, например, Гончаровым (2016б, 2017), Гончаровым, Мосенковым (2017а, 2017б, 2018, 2019, 2021а, 2021б) и Гончаровым и др. (2022). Эти исследования показывают, что случайные и систематические ошибки всех современных двумерных и трехмерных карт, в лучшем случае, составляют около $\sigma(A_V) = 0.08$. То есть они несколько ниже, чем типичные ошибки индивидуальных поглощений ($\sigma(A_V) = 0.15$ для ярких звезд в AKQ22), но все еще сравнимы с самими оценками поглощения вблизи Солнца и в высоких широтах. Поэтому и разногласия между картами особенно заметны в этих областях. Например, оценки полного галактического поглощения при $|b| > 80^\circ$ из G17 и LVB22 несовместимы: $A_V = 0.18 \pm 0.07$ против 0.02 ± 0.03 соответственно (указаны декларированные авторами случайные ошибки, а реальные ошибки, очевидно, гораздо больше; см. также рис. 8 и его обсуждение).

Основной вклад в итоговую неопределенность оценок из наиболее популярных двумерных карт вносит, видимо, неопределенность калибровки эмиссия—покраснение (Гончаров, 2016б; Гончаров, Мосенков, 2017б, 2018, 2021а). Итоговая неопределенность оценок трехмерных карт формируется из множества неопределенностей, возникающих в попытках найти баланс между максимальным разрешением карты и максимальным числом звезд в каждой ее ячейке. При этом особенно влиятельны неопределенность используемых расстояний, неполнота рассматриваемых выборок звезд и ошибочность исходных предположений о звездах (например, звезды с небольшим покраснением ошибочно рассматриваются как непокрасневшие, двойные звезды — как одиночные, субгиганты — как карлики и т.п.).

До сих пор не удалось создать трехмерную карту, одинаково точную и подробную как вблизи, так и вдали (скажем, в нескольких кпк) от Солнца. Относительно точные расстояния в проекте Gaia могут быть получены только для сравнительно близких к Солнцу звезд. Например, только в радиусе 2.5 кпк вокруг Солнца почти все звезды Gaia имеют сравнительно высокую (лучше 0.25) относительную точность расстояний. Расширение же рассматриваемого пространства существенно дальше 2.5 кпк приводит к тому, что в выборке преобладают звезды с весьма неточными расстояниями. Они вносят большие систематические ошибки в оценки трехмерной карты. Кроме того, современная трехмерная или двумерная карта, основанная на оптической фотометрии, не может

простирается слишком далеко от Солнца около основной плоскости Галактики, так как там пыль заслоняет значительное число звезд и искажает оценки.

Оценки толщины галактического слоя пыли, полученные например, Гончаровым, Мосенковым (2021б), показывают заметный рост поглощения не далее $|Z| \approx 450$ пк от основной плоскости Галактики. Следовательно, даже рассматривая поглощение лишь в радиусе 2 кпк от Солнца, мы тем не менее определяем полное галактическое поглощение для всех внегалактических объектов на широте $|b| > \arcsin(450/2000) \approx 13^\circ$.

Все эти соображения заставляют нас при создании трехмерной карты поглощения уделить особое внимание пространству вблизи Солнца и в высоких широтах вдали от основной плоскости Галактики. Для этого мы i) строим карты в радиусе 2 кпк от Солнца, используя данные для звезд в радиусе 2.5 кпк от Солнца с учетом неопределенности расстояний; ii) задаем шаг сетки координат 50 пк, т.е. равномерный по расстоянию, а не по модулю расстояния $D = 5 \log_{10}(R) - 5$, как во многих других картах, охватывающих большее пространство, но менее подробных вблизи Солнца; iii) принимаем угловое и пространственное разрешение карты, которое обеспечивает приемлемое число используемых звезд во всех пространственных ячейках; iv) используем карлики, а не гиганты, чтобы вблизи Солнца выборка была полнее, а фотометрия не передержана.

В настоящем исследовании мы представляем созданные нами на основе данных АКQ22 пять карт: трехмерные карты поглощения A_V , поглощения A_G и дифференциального поглощения A_V/R вдоль лучей зрения в радиусе 2 кпк от Солнца, трехмерную карту вариаций соотношения поглощений A_G/A_V , которое может быть связано с законом поглощения (т.е. зависимостью поглощения от длины волны) в радиусе 800 пк от Солнца и двумерную карту полного галактического поглощения A_V сквозь весь полуслой пыли от Солнца до внегалактического пространства для широт $|b| > 13^\circ$.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Основными данными для наших трехмерных и двумерных карт послужили оценки расстояния R и поглощения A_V из АКQ22. Кратко опишем их.

Как отмечено во Введении, входными данными для оценок в АКQ22 послужили параллаксы и некоторые другие характеристики звезд из Gaia EDR3, фотометрия в полосах G , BP и RP из Gaia EDR3, g_{PS1} , r_{PS1} , i_{PS1} , z_{PS1} и y_{PS1} из PS1, g_{SMSS} , r_{SMSS} , i_{SMSS} и z_{SMSS} из SMSS, J и K_s из 2MASS,

$W1$ и $W2$ из каталога AllWISE (одна из версий результатов телескопа WISE) для тех же звезд Gaia EDR3, а также декларируемые АКQ22 неопределенности всех использованных оценок. Эти данные были откалиброваны, исправлены и отобраны авторами АКQ22 в соответствии с рекомендациями авторов использованных наборов данных Gaia, PS1, SMSS, 2MASS и AllWISE. В частности, параллаксы были откалиброваны в соответствии с рекомендациями консорциума Гайя (2021в), а точная фотометрия отобрана в соответствии с критериями консорциума Гайя (2021б). В процессе обработки данных АКQ22 сформулировали несколько своих критериев отбора высококачественных оценок R и A_V . Мы использовали оценки АКQ22 с критериями `fidelity > 0.5` (достаточно точная астрометрия звезды), `s.sh_outflag='%%00'` (разумные неопределенности используемых величин), `(av84-av16)/2 < 0.25` (точность поглощения лучше 0.25), `(dist84-dist16)/2/dist50 < 0.25` (относительная точность R лучше 0.25). Карлики отобраны нами по критерию `logg50 > 3.95` для поверхностной силы тяжести.

Для вычисления R и A_V по исходным данным АКQ22 использовали код StarHorse, описанный Кюироз и др. (2018). Этот код вычисляет наиболее вероятные оценки R , A_V , возраста, массы, эффективной температуры, металличности и поверхностной силы тяжести для звезд из сопоставления теоретических изохрон PARSEC1.2S+COLIBRIS37 (Брессан и др., 2012) и входных измеренных величин на диаграммах “цвет — звездная величина”. На определяемые величины накладываются обоснованные начальные ограничения в соответствии с представлениями о строении и эволюции звезд в Галактике (например, о начальной функции масс) и таких компонентов Галактики, как тонкий и толстый диски, сферическое гало и трехосная структура из балджа и бара. Используемые изохроны вычислены только для солнечной шкалы металличности, без учета обогащения альфа-элементами в галактическом гало.

Для используемых нами оценок важно, что АКQ22 наложили широкие начальные ограничения на оценки A_V в соответствии с оценками покраснения из карты GSZ19 и трехмерной модели пространственных вариаций покраснения Дриммеля и др. (2003, далее — DCL03). Как отмечено самими авторами GSZ19 и DCL03, они дают неудовлетворительные оценки вблизи Солнца. Кроме того, в упомянутых во Введении работах Гончарова и соавторов показано, что оценки GSZ19 и DCL03 неудовлетворительны и в высоких галактических широтах. Следовательно, ошибки GSZ19 и DCL03 могут привести к ошибкам оценок в АКQ22. Одна

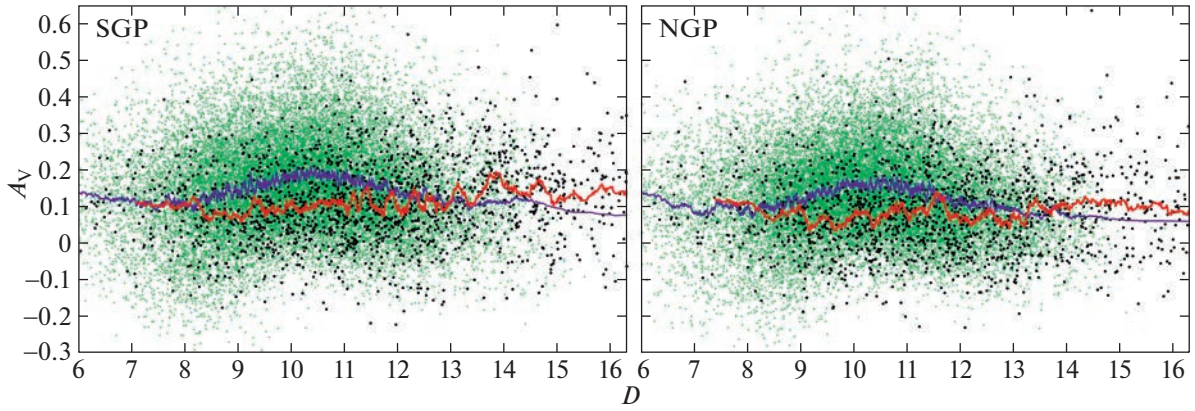


Рис. 1. Поглощение A_V для карликов (зеленые символы и фиолетовые кривые скользящего среднего по 150 точкам) и гигантов (черные символы и красные кривые скользящего среднего по 40 точкам) из АКQ22 в радиусе 4 градусов от южного (SGP) и северного (NGP) галактических полюсов в зависимости от модуля расстояния D .

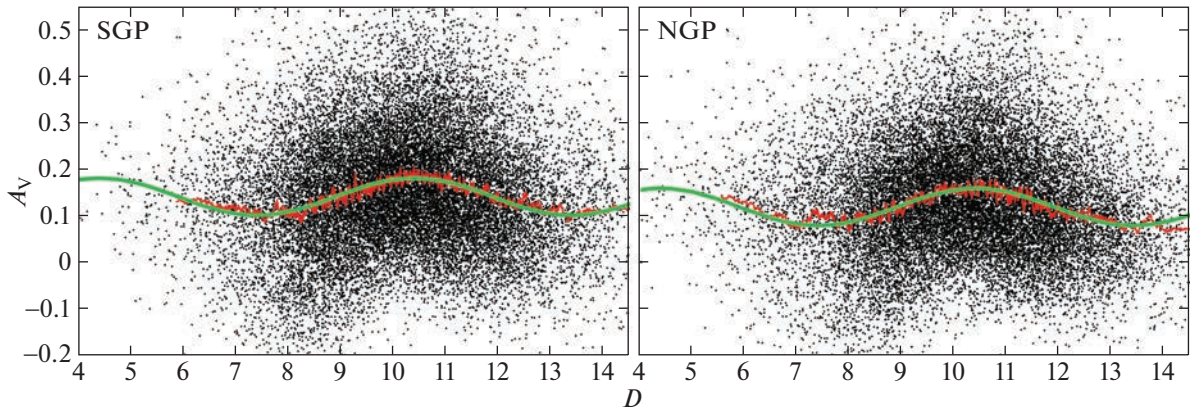


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но только для карликов (черные символы и красные кривые скользящего среднего по 150 точкам). Зеленая кривая показывает аппроксимацию уравнениями (1) и (2) для SGP и NGP соответственно.

из систематических ошибок АКQ22 рассмотрена далее.

На рис. 1 показаны систематические вариации поглощения для карликов и гигантов, отобранных нами из АКQ22 в радиусе 4 градусов от южного (SGP) и северного (NGP) галактических полюсов, в зависимости от модуля расстояния D . И для карликов, и для гигантов вариации поглощения не являются монотонными даже после сильного сглаживания. Кроме того, для обоих классов звезд поглощение систематически меняется даже при $D > 10$, т.е. при $R > 1000$, или $|Z| > 1000$ пк, учитывая, что рассматриваются окрестности полюсов. Это совершенно не соответствует представлениям о толщине галактического слоя пыли около $|Z| < 450$ (Гончаров, Мосенков, 2021б). Следовательно, оценки для обоих классов звезд искажены систематическими ошибками. Пространственная плотность распределения гигантов в радиусе 2.5 кпк от Солнца совершенно недостаточна как для анализа этих ошибок, так и для построения подробных и точных трехмерных карт поглощения.

Поэтому в настоящем исследовании мы используем только карликов, а именно 99 889 339 карликов из АКQ22 в радиусе 2.5 кпк от Солнца. Отметим, что 1 171 388 (1%) из них имеют отрицательные оценки поглощения в АКQ22, отражая тот факт, что звезда может быть и голубее соответствующей изохроны на диаграмме ‘цвет–величина’ из-за ошибок фотометрии, расстояния, классификации звезды и других причин.

Рисунок 2 повторяет рис. 1, но только для карликов. Видно, что систематические вариации поглощения хорошо аппроксимируются синусоидами, найденными нами:

$$A_V = 0.14 + 0.04 \sin(1.0467D - 3.035), \quad (1)$$

$$A_V = 0.12 + 0.04 \sin(1.0467D - 3.035), \quad (2)$$

для SGP и NGP соответственно, где аргумент синуса выражен в радианах.

Эта систематика влияет на результаты любого исследования с использованием данных АКQ22,

особенно вблизи Солнца и в высоких широтах, где амплитуда этой систематики сравнима с самими оценками поглощения. Несомненно, это требует отдельного исследования. Мы не нашли однозначного объяснения этой систематики, но заметим следующее.

Авторы АКQ22 отметили, что широко- и среднеполосная фотометрия, использованная ими, слабо чувствительна к металличности. Это может приводить к большим ошибкам оценок металличности из АКQ22. Пространственное распределение звезд, для которых АКQ22 нашли низкую металличность, показано на их рис. 10, обсуждается АКQ22 и не полностью соответствует общепринятым представлениям о Галактике. Более того, сравнение оценок металличности из АКQ22 с заведомо более точными астросейсмическими и спектроскопическими оценками на рис. 17 и 18 из АКQ22 и в их обсуждении показывает, что АКQ22 могли систематически недооценить металличность значительного числа звезд. Учитывая, что малометаллические звезды в среднем систематически голубее и слабее высокометаллических, объяснение систематики на рис. 2 может быть следующим. АКQ22 могут ошибочно рассматривать многие высокометаллические звезды как малометаллические, и тогда их наблюдаемый сравнительно красный цвет ошибочно интерпретируется как большое покраснение малометаллической звезды со сравнительно голубым нормальным цветом вместо того, чтобы признать малое покраснение высокометаллической звезды со сравнительно красным нормальным цветом. Наоборот, малометаллические звезды могут ошибочно рассматриваться как высокометаллические. Это может дать не один, а несколько экстремумов в вариациях поглощения от расстояния из-за того, что АКQ22 делят звезды на тонкий диск, толстый диск и гало. Другое вероятное объяснение упомянутой систематики — влияние многочисленных неразрешенных двойных карликов, которое игнорируется АКQ22. Такие карлики выглядят ярче и краснее, чем предполагается моделью одиночного карлика. Аналогично ошибке с металличностью, их наблюдаемый сравнительно красный цвет ошибочно интерпретируется как большое покраснение одиночной звезды со сравнительно голубым нормальным цветом. В этом случае синусоидальная зависимость ошибки от расстояния объясняется максимальным влиянием неразрешенных двойных на некотором расстоянии: на меньшем расстоянии больше разрешенных двойных, а на большем расстоянии влияние неразрешенных двойных должно быть меньше ошибок фотометрии.

В результате мы исключили эту систематику, приняв эмпирическую поправку $\Delta A_V = -0.04 \sin(1.0467D - 3.035)$. Таким образом, мы принимаем за истину средние значения синусоид

(1) и (2) и, соответственно, сохраняем неизменным среднее поглощение для карликов. Это кажется разумным, так как при $D > 11$ средние поглощения по карликам и гигантам близки, как видно из рис. 1. Однако при $8 < D < 11$ оценки A_V для гигантов в среднем на 0.04 звездной величины ниже оценок для карликов. Если в будущем выяснится, что эти оценки для гигантов ближе к истине, оценки A_V в представленных нами картах надо уменьшить на 0.04 звездной величины.

Среднее поглощение сквозь весь полуслой пыли в направлении SGP или NGP по карликам АКQ22 составляет $A_V \approx 0.14$ и 0.12 соответственно. Разница $\Delta A_V = 0.02$ между этими значениями отражает тот факт, что Солнце находится выше основной плоскости Галактики и основной экваториальной концентрации галактической пыли. Учитывая оценку этого смещения как 15 пк (Гончаров 2008, 2011, 2012с), очевидно, что это поглощение $\Delta A_V = 0.02$ возникает в слое пыли ниже Солнца, в пределах примерно $-30 < |Z| < 0$ пк. Уже одно это не позволяет считать поглощение в радиусе, скажем, 30 пк от Солнца пренебрежимо малым. Хотя, надо признать, что разница в полном поглощении в направлении SGP и NGP столь мала, что до сих пор отмечена лишь в некоторых картах и моделях: $\Delta A_V = 0.013, 0.010, 0.013, 0.011, 0.016$ и 0.012 согласно SFD98, DCL03, Аморец, Лепине (2005, далее — AL05)⁶, SF11, MF15 и TGE соответственно (см. рис. 8).

Отметим, что принятая поправка повлияла преимущественно в сторону уменьшения оценок поглощения i) вблизи Солнца в наших трехмерных картах, так как в диапазоне $2.9 < D < 5.9$, т.е. $38 < R < 150$ пк, поправка отрицательна, а также ii) в высоких широтах в нашей двумерной карте, так как мы использовали карлики в диапазоне $450 < |Z| < 2500$ пк, т.е. преимущественно $900 < R < 2500$ пк, или $9.8 < D < 12$, где преобладает отрицательная поправка.

Для удобства использования и интерполирования мы приняли для наших карт равномерную сетку координат с шагом 20 угл. мин для трехмерных карт (с учетом влияния косинуса широты на шаг по долготе) и 6.1 угл. мин для двумерной карты (совпадает с разрешением SFD98 для удобства сравнения).

Координатная сетка наших карт выбрана так, что для каждой широты есть отсчет на долготе $l = 180^\circ$, а остальные узлы сетки для данной широты расположены симметрично относительно отсчета на $l = 180^\circ$. Такая сетка лишена отсчетов около $l = 0^\circ$, которые, как показывают прежние карты, наименее полезны из-за больших градиентов всех

⁶ <http://www.galexextin.org/>

рассматриваемых величин в направлении на центр Галактики.

Хотя шаг сетки координат наших карт фиксирован, для оптимизации числа используемых звезд в ячейках трехмерных карт мы приняли размер окна осреднения поперек луча зрения и, соответственно, тангенциальное разрешение карт зависящим от R . Для заданного R мы принимаем более низкое из разрешений в 20 угл. мин или 3.55 пк (второе соответствует 6.1 угл. мин на удалении 2 кпк). Таким образом, на удалении от 50 до 2000 пк от Солнца разрешение меняется от 4.06 градуса до 20 угл. мин, или от 3.55 до 11.64 пк. Принятое радиальное разрешение 50 пк значительно хуже тангенциального разрешения из-за большой неопределенности R . Видимо, будущие более точные параллаксы для более полных выборок Gaia позволят повысить радиальное разрешение карт.

Некоторые карты других авторов имеют более высокое угловое (3.4 угл. мин у GSZ19) или пространственное (25 пк у LVB22) разрешение. Однако вблизи Солнца или вдали от основной плоскости Галактики это приводит к ненадежным результатам из-за нехватки звезд в пространственных ячейках. Например, именно из-за недостаточного числа звезд в ячейках, GSZ19 дает ошибочное нулевое покраснение для многих ячеек вдали от основной плоскости Галактики (см. обсуждение Гончарова и др., 2022, и рис. 8 в разделе “Трехмерные карты”).

Наша двумерная карта содержит 3 095 841 ячеек на небе, а трехмерная карта A_V — 8 724 902 пространственных ячеек. Распределение пространственных ячеек трехмерной карты по числу использованных карликов показано на рис. 3.

В каждой ячейке индивидуальные поглощения осредняются. Двумерная карта является результатом такого осреднения для звезд с $|Z| > 450$ и $R > 2000$ пк и, соответственно, для широт $|b| > \arcsin(450/2000) \approx 13^\circ$. Для трехмерных карт A_V и A_G после осреднения в описанных ранее окнах есть многочисленные случаи, когда на одном луче зрения поглощение убывает с расстоянием. Это является результатом флуктуаций пылевой среды и ошибок в оценках расстояния и поглощения. Для исключения этого мы выравниваем оценки поглощения на каждом луче зрения, увеличивая и уменьшая соседние оценки итерациями так, чтобы в итоге поглощение не уменьшалось с расстоянием. При этом оценки поглощения из наших трехмерных карт на удалении $|Z| = 450$ пк согласуются с оценками из нашей двумерной карты. Фактически итоговая кривая роста поглощения с расстоянием для луча зрения является наиболее вероятной неубывающей кривой, проходящей среди индивидуальных оценок поглощения на этом луче зрения. Это выравнивание требует десятки и сотни итераций

и поэтому весьма требовательно к вычислительным ресурсам. Такое выравнивание выполняется при создании любой современной карты покраснения/поглощения (см., например, GSZ19 и GCY21).

Трехмерные карты соотношения A_G/A_V и дифференциального поглощения вычисляются по картам A_V и A_G .

Точность полученных карт можно оценить из следующих соображений. Как следует из рис. 3, для вычисления поглощения в пространственной ячейке мы использовали, как правило, несколько десятков карликов. Примерно такова же статистика для ячеек двумерной карты. При случайной ошибке индивидуального поглощения $\sigma(A_V) = 0.20$ для типичного рассматриваемого нами карлика со звездной величиной $G = 18$ случайная ошибка результата в 94% ячеек $\sigma(A_V) < 0.04$. Отметим, что систематическая точность использованных поглощений АКQ22 достаточно высока с учетом того, что мы не нашли никаких существенных ее проявлений в зависимостях от каких-либо параметров, кроме упомянутой ранее синусоидальной зависимости поглощения от R . Однако в общую неопределенность результата вносят вклад также неопределенность индивидуального R , поверхностной силы тяжести (через критерий выделения карликов $\log g_{50} > 3.95$) и систематическая неопределенность, равная внесенной нами поправке за эмпирическую синусоидальную зависимость поглощения от R (так как причина этой систематики не ясна), достигающей 0.04 звездной величины. Из-за увеличения размера ячейки с R , число карликов в ячейке уменьшается с R довольно медленно, а случайная ошибка поглощения пропорциональна квадратному корню от числа карликов. Кроме того, неопределенность индивидуальных R в пределах 2.5 кпк от Солнца растет с R медленно. Более того, синусоидальная зависимость поглощения от R не зависит от самого R . Поэтому в итоге можно гарантировать, что полная неопределенность оценок поглощения для протяженных объектов в наших картах всюду не превосходит $\sigma(A_V) = 0.06$. Эта точность выше упомянутой ранее типичной точности лучших современных карт $\sigma(A_V) = 0.08$ за счет более высокой точности использованных поглощений АКQ22 и в меньшей мере — за счет оптимизации размера ячейки.

Чтобы оценить точность предсказаний наших карт для индивидуальных звезд и других точечных объектов, нужно учесть естественные флуктуации пылевой среды, которые составляют от $\sigma(A_V) = 0.06$ около галактических полюсов до $\sigma(A_V) = 0.33$ вблизи галактического экватора (и еще выше в некоторых небольших областях), как определено Гончаровым и др. (2022) по стандартному

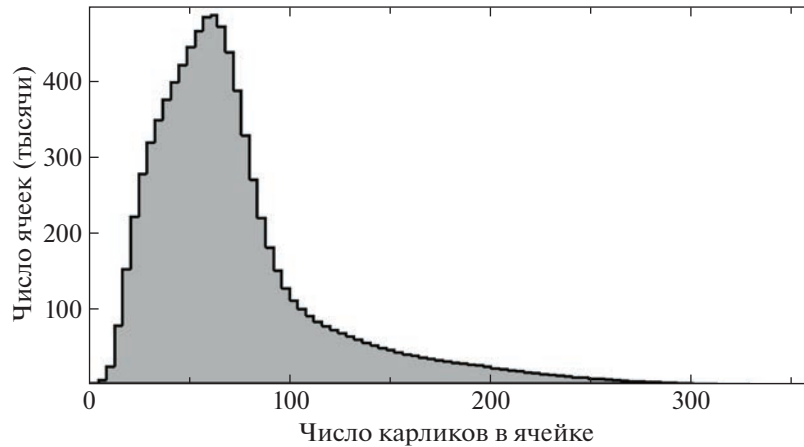


Рис. 3. Распределение пространственных ячеек нашей трехмерной карты по числу использованных карликов.

Таблица 1. Полученная двумерная карта A_V (полностью дана в электронном виде)

l (градусы)	b (градусы)	Минимальное R (парсеки)	Окно (градусы)	Число карликов	A_V	
180.0000	−89.9750	450.0	0.102	19	0.138	
180.0000	−89.8733	450.0	0.102	17	0.116	
134.0141	−89.8733	450.0	0.102	9	0.087	
88.0281	−89.8733	450.0	0.102	10	0.101	
42.0422	−89.8733	450.0	0.102	15	0.126	
225.9859	−89.8733	450.0	0.102	13	0.125	
271.9719	−89.8733	450.0	0.102	13	0.154	
317.9578	−89.8733	450.0	0.102	22	0.168	
...	...	...	...	...	...	...

отклонению оценок поглощения из АКQ22. Следовательно, точность предсказаний наших карт для точечного объекта составляет от $\sigma(A_V) = (0.06^2 + 0.06^2)^{0.5} = 0.08$ около галактических полюсов до $\sigma(A_V) = (0.06^2 + 0.33^2)^{0.5} = 0.34$ вблизи галактического экватора. Мы аппроксимировали эту зависимость от широты полиномом $\sigma(A_V) = -4.0 \times 10^{-7} \cdot |b|^3 + 1.0 \times 10^{-4} \cdot |b|^2 - 0.0086|b| + 0.34$. Таким образом, в высоких широтах, примерно при $|b| > 60^\circ$, предсказания наших карт даже для индивидуальных звезд точнее, чем предсказания для них же из АКQ22 с типичной неопределенностью $\sigma(A_V) \approx 0.18$. В более низких широтах оценки наших и других подобных карт и моделей покраснения/поглощения имеют практическое применение только для звезд, не имеющих индивидуальных

оценок,⁷ или для протяженных объектов (это более 10 тысяч галактик, звездных скоплений, различных облаков и других объектов).

ДВУМЕРНАЯ КАРТА

Таблица 1 представляет нашу двумерную карту. На рис. 4 показаны вариации поглощения A_V по небу в соответствии с нашей двумерной картой и двумерными картами SFD98 и TGE (для TGE принято рекомендованное авторами оптимальное угловое разрешение). Для удобства сравнения мы исключили низкие широты, где нет наших оценок.

⁷ В радиусе 2 кпк от Солнца это несколько миллиардов, или 99% всех звезд, в том числе, около 400 млн ($\approx 80\%$) звезд из Gaia DR3).

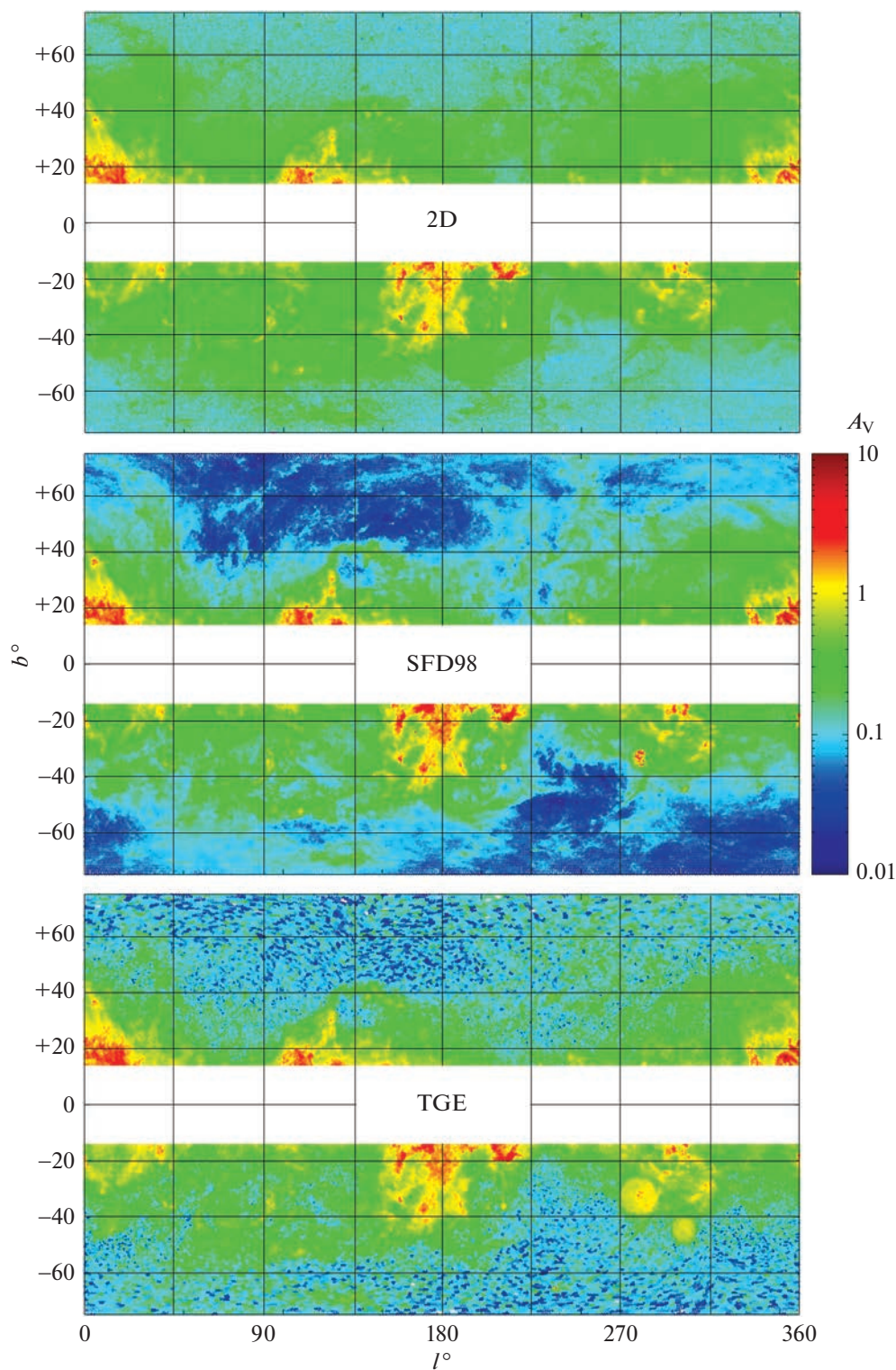


Рис. 4. Вариации поглощения A_V по небу в соответствии с нашей двумерной картой (2D) и картами SFD98 и TGE.

Видно, что в средних широтах все карты согласуются друг с другом, демонстрируя, прежде всего, известные облачные комплексы пояса Гулда в двух противоположных районах с координатами $l \approx 0^\circ$, $b \approx +20^\circ$ и $l \approx 180^\circ$, $b \approx -20^\circ$, которые обсужда-

лись, например, Дэймом и др. (2001), Гончаровым (2009, 2012б) и Гончаровым и др. (2022). В высоких широтах рис. 4 показывает, что наши оценки, как правило, в несколько раз выше оценок SFD98, в то время как оценки TGE — промежуточные.

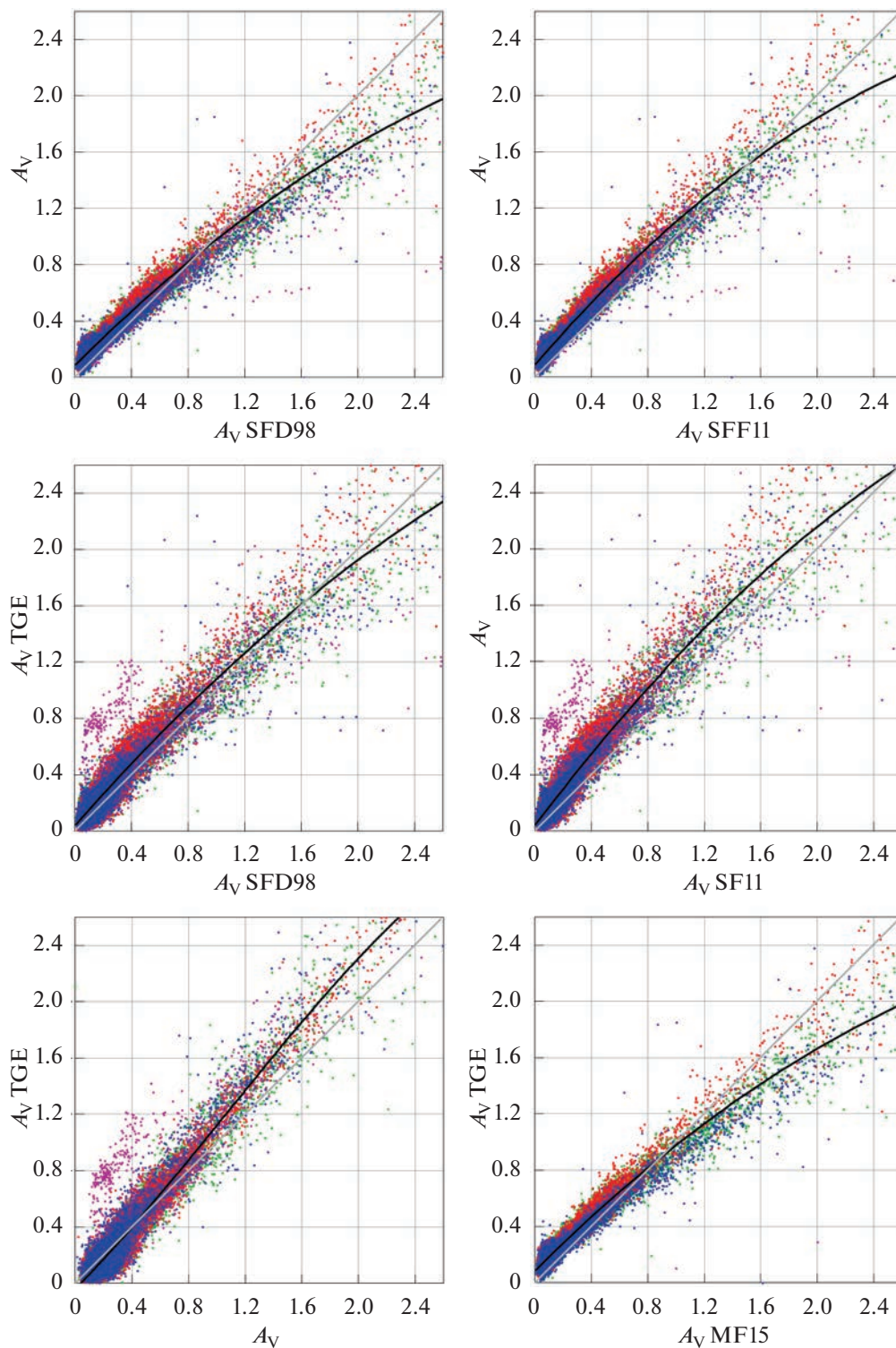


Рис. 5. Поглощение A_V по нашей двумерной карте в сравнении с оценками по двумерным картам SFD98, SF11, TGE и MF15 для случайно отобранных 32 000 лучей зрения в первом (красные символы), втором (зеленые символы), третьем (синие символы) и четвертом (фиолетовые символы) галактических квадрантах. Оценки для первого и третьего квадрантов вынесены на передний план. Серые прямые показывают соотношение один к одному, черные кривые — наилучшую аппроксимацию соотношения оценок полиномом третьей степени.

Это видно и в оценках полного галактического поглощения сквозь весь слой пыли в направлении галактических полюсов: $A_V = 0.12, 0.05$ и 0.07 по нашей двумерной карте, SFD98 и TGE соответственно.

На рис. 5 дано сравнение оценок из нашей двумерной карты с оценками из карт SFD98, SF11, MF15 и TGE для 32 000 случайно отобранных площадок размером 6.1×6.1 угл. мин (разным цветом показаны оценки в разных галактических квадрантах). Отметим, что явно отскакившие от биссектрисы оценки TGE (фиолетовые символы, т.е. оценки в четвертом галактическом квадранте) относятся к областям неба с Магеллановыми облаками, где, как и следовало ожидать, трудно учесть поглощение внутри этих облаков.

Отметим линейную зависимость между оценками SFD98 и SF11 из-за метода создания SF11, и известную ранее близость оценок SFD98 и MF15.

TGE использовали те же данные, что и мы, но обработали их другим методом. Это объясняет хорошее согласие наших оценок с TGE в систематическом отношении. На рис. 5 показано примерно линейное соотношение между оценками TGE и нашими, хотя обе карты показывают существенно нелинейные соотношения с картами SFD98, SF11 и MF15, полученными по ИК-эмиссии. Таким образом, и TGE, и наша карта подтверждают известную из прежних исследований (см. обзор Гончарова, 2016б) недооценку картами SFD98, SF11 и MF15 малых покраснений/поглощений и, возможно, переоценку больших. Впрочем, для больших поглощений этот эффект нивелирован тем, что и наша карта, и TGE могут недооценивать большие поглощения из-за того, что, возможно, не пронзают весь галактический слой пыли насквозь, теряя полноту выборки в далеких запыленных районах.

Недооценка малых покраснений/поглощений картами SFD98, MF15 и SF11 из-за их систематических ошибок, прежде всего, ошибок калибровки “ИК-эмиссия — покраснение”, требует отдельного исследования. Наши результаты показывают, что данные AKQ22 и последующие результаты Gaia являются подходящим материалом для такого исследования. В настоящей работе мы лишь отметим зависимость разности между нашими оценками и оценками этих трех карт от галактической долготы. Чтобы подчеркнуть эту зависимость, на рис. 5 мы вынесли оценки для первого и третьего квадрантов на передний план (красные и синие символы), а столь же многочисленные оценки для второго и четвертого квадрантов — на задний план. Видно, что отклонение оценок от биссектрисы зависит от l и экстремально в первом и третьем квадрантах. Возможно, это связано с тем, что в этих квадрантах

поглощение, как правило, максимально и минимально соответственно.

Хотя наши оценки и TGE согласуются в систематическом отношении, случайный разброс их разностей велик, особенно для малых поглощений, как видно из рис. 5: например, при $|b| > 45^\circ$ медианное стандартное отклонение разностей A_V составляет 0.06. Для малых поглощений (и высоких широт) оценки SFD98, SF11 и MF15 согласуются с нашими в случайном отношении гораздо лучше (при $|b| > 45^\circ$ медианное стандартное отклонение составляет 0.03), чем с оценками TGE (при $|b| > 45^\circ$ медианное стандартное отклонение 0.06). Возможная причина — какие-то методические недостатки TGE. Для больших поглощений (и средних широт) ситуация совершенно иная: наши оценки согласуются с TGE гораздо лучше (при $|b| < 20^\circ$ медианное стандартное отклонение составляет 0.2), чем те и другие — с SFD98, SF11 и MF15 (при $|b| < 20^\circ$ медианное стандартное отклонение около 0.4). Возможная причина — худшее угловое разрешение нашей карты и TGE по сравнению с остальными и, следовательно, более сильное сглаживание естественных флуктуаций среды.

Отметим также, что наши оценки очень хорошо согласуются с таковыми из SF11 и в случайном, и в систематическом отношении, если к последним добавить постоянное поглощение $\Delta A_V = 0.08$. Вероятно, это отражает систематическую недооценку малых поглощений в SF11 и примерно такую же — в SFD98 и MF15.

Для оценки точности предсказаний нашей двумерной карты мы сравнили их в табл. 2 и на рис. 6 с наиболее точными оценками поглощения для шаровых скоплений нашей Галактики с $|b| > 13^\circ$, а) полученными Клементини и др. (2022) из анализа переменных звезд RR Лиры в скоплениях NGC 288, NGC 5139 и IC 4499 (красные квадраты) и б) полученными разными авторами из сопоставления фотометрии и теоретических изохрон на диаграммах ‘цвет–величина’ и другими методами, не зависящими от оценок из карт и моделей поглощения (черные ромбы). Во втором случае мы рассмотрели 47 известных шаровых скоплений ближе 30 кпк от Солнца (для более далеких скоплений оценки из литературы не точны). Оценки расстояний до скоплений взяты из Баумгардта и Васильева (2021), кроме скоплений Terzan 7 и Terzan 8 с оценками из Харриса (1996). Оценки покраснения/поглощения для скоплений взяты нами из исследований Гончарова и др. (2019, 2020, 2021, 2023а), Доттера и др. (2011), Беллаццини и др. (2002), Коха, МакВильяма (2014), Хамрика и др. (2021), Рецио-Бланко и др. (2005), Вагнера-Кайзера и др. (2016) и Вагнера-Кайзера и др. (2017) с предпочтением именно в таком порядке,

Таблица 2. Оценки $A_{V \text{ obs}}$ для галактических шаровых скоплений с $|b| > 13^\circ$ из литературы в сопоставлении с предсказаниями $A_{V \text{ calc}}$ по нашей двумерной карте

Имя	R (кпк)	l (градусы)	b (градусы)	$A_{V \text{ calc}}$	$A_{V \text{ obs}}$	Ссылка
IC4499	18.9	307.35	-20.47	0.75	0.63 ± 0.13	Доттер и др., 2011
IC4499	18.9	307.35	-20.47	0.75	0.79 ± 0.28	Клементини и др., 2022
NGC104	4.5	305.90	-44.89	0.16	0.11 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC288	9.0	151.28	-89.38	0.16	0.08 ± 0.16	Гончаров и др., 2021
NGC288	9.0	151.28	-89.38	0.16	0.08 ± 0.09	Клементини и др., 2022
NGC362	8.8	301.54	-46.25	0.21	0.11 ± 0.13	Гончаров и др., 2021
NGC1261	16.4	270.54	-52.12	0.10	0.09 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC1851	12.0	244.51	-35.04	0.21	0.16 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC1904	13.1	227.23	-29.35	0.31	0.10 ± 0.13	Хамрик и др., 2021
NGC2298	9.8	245.63	-16.01	0.63	0.89 ± 0.20	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC4147	18.5	252.85	+77.19	0.14	0.11 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC4590	10.4	299.63	+36.05	0.27	0.22 ± 0.15	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC5024	18.5	332.96	+79.76	0.12	0.09 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC5053	17.5	335.70	+78.95	0.16	0.07 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC5139	5.4	309.10	+14.97	0.49	0.50 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC5139	5.4	309.10	+14.97	0.49	0.52 ± 0.43	Клементини и др., 2022
NGC5272	10.2	42.22	+78.71	0.08	0.09 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC5466	16.1	42.15	+73.59	0.16	0.06 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC5634	26.0	342.21	+49.26	0.30	0.20 ± 0.13	Беллаццини и др., 2002
NGC5897	12.5	342.94	+30.29	0.42	0.40 ± 0.13	Кох, МакВильям, 2014
NGC5904	7.5	3.86	+46.80	0.19	0.20 ± 0.13	Гончаров и др., 2019
NGC5986	10.5	337.02	+13.27	1.07	0.99 ± 0.16	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC6093	10.3	352.67	+19.46	0.78	0.76 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC6101	14.4	317.75	-15.82	0.43	0.42 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC6121	1.9	350.97	+15.97	1.45	1.44 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC6144	8.2	351.93	+15.70	1.48	1.50 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC6171	5.6	3.37	+23.01	1.38	1.46 ± 0.20	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC6205	7.4	59.01	+40.91	0.21	0.12 ± 0.13	Гончаров и др., 2020
NGC6218	5.1	15.72	+26.31	0.71	0.63 ± 0.13	Гончаров и др., 2021
NGC6229	30.1	73.64	+40.31	0.21	0.06 ± 0.13	Рецио-Бланко и др., 2005
NGC6254	5.1	15.14	+23.08	0.75	0.86 ± 0.20	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC6341	8.5	68.34	+34.86	0.30	0.10 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC6362	7.6	325.55	-17.57	0.34	0.19 ± 0.13	Гончаров и др., 2023а
NGC6366	3.4	18.41	+16.04	2.62	2.28 ± 0.18	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC6426	20.7	28.09	+16.23	1.21	1.25 ± 0.16	Доттер и др., 2011
NGC6584	13.6	342.14	-16.41	0.44	0.32 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC6715	26.3	5.61	-14.09	0.60	0.51 ± 0.25	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC6723	8.3	0.07	-17.30	0.59	0.24 ± 0.13	Гончаров и др., 2023а
NGC6752	4.1	336.49	-25.63	0.27	0.24 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC6809	5.3	8.79	-23.27	0.35	0.37 ± 0.13	Гончаров и др., 2023б
NGC6864	20.5	20.30	-25.75	0.66	0.65 ± 0.13	Рецио-Бланко и др., 2005
NGC6934	15.7	52.10	-18.89	0.40	0.37 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC6981	16.7	35.16	-32.68	0.26	0.19 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC7078	10.7	65.01	-27.31	0.35	0.32 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
NGC7089	11.7	53.37	-35.77	0.22	0.21 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
NGC7099	8.5	27.18	-46.84	0.22	0.17 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2016
Palomar5	21.9	0.84	+45.86	0.36	0.28 ± 0.13	Доттер и др., 2011
Palomar12	18.5	30.51	-47.68	0.20	0.11 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
Terzan7	22.8	3.39	-20.07	0.39	0.22 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017
Terzan8	26.3	5.76	-24.56	0.51	0.45 ± 0.13	Вагнер-Кайзер и др., 2017

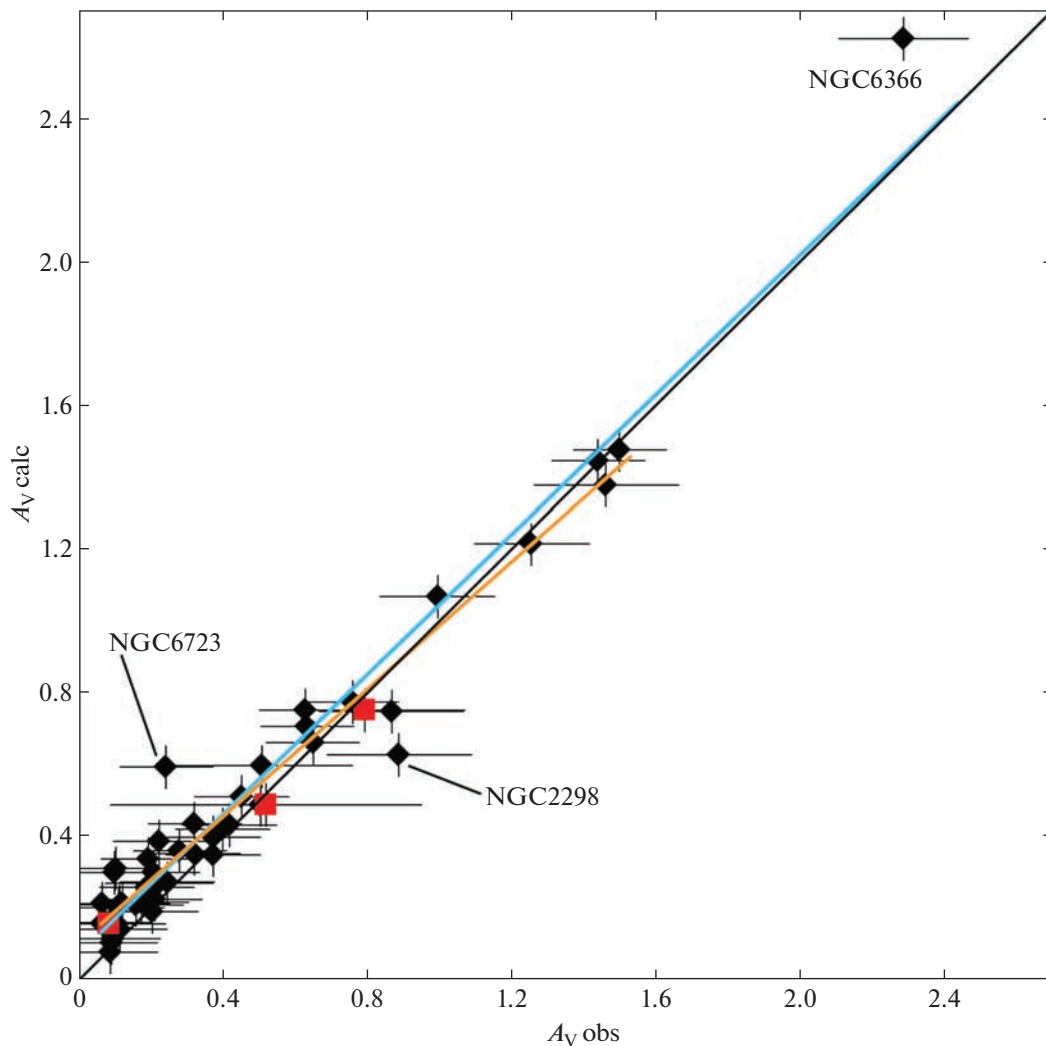


Рис. 6. Оценки $A_{V \text{ obs}}$ для галактических шаровых скоплений из литературы в сопоставлении с предсказаниями $A_{V \text{ calc}}$ по нашей двумерной карте — черные символы. Оценки Клементини и др. (2022) для NGC 288, NGC 5139 и IC 4499 отмечены красными квадратами. Черная прямая показывает соотношение один к одному, синяя и оранжевая прямые — линейную аппроксимацию соотношения наблюдений и предсказаний методом наименьших квадратов с учетом и без учета NGC 6366 соответственно.

реалистичную на наш взгляд оценку неопределенности с учетом вариаций поглощения в поле зрения скопления по данным Бонатто и др. (2013), но не меньше $\sigma(A_V) = 0.13$. Для оценок из Клементини и др. (2022) мы приняли неопределенности, декларированные авторами. Все использованные нами оценки покраснения или поглощения пересчитаны в оценки поглощения A_V с использованием закона поглощения Карделли и др. (1989) с номинальным соотношением поглощения к покраснению $R_V \equiv A_V/E(B-V) = 3.1$ с учетом того, что наблюдаемое соотношение $A_V/E(B-V)$ зависит от спектрального распределения энергии непокрашившей звезды. Соответственно, для шаровых скоплений с преобладанием сравнительно холодных и мало-металлических звезд мы приняли медианное соотно-

шение $A_V/E(B-V) = 3.3$ из Касагранде, Вандэнберга (2014).

На рис. 6 видно хорошее согласие между предсказаниями нашей карты (с неопределенностью $\sigma(A_V) = 0.06$) и оценками из литературы. Синяя и оранжевая прямые на рис. 6 показывают линейную аппроксимацию соотношения наблюдений и предсказаний методом наименьших квадратов с учетом и без учета NGC 6366 соответственно. Видно, что для малых поглощений наши оценки, возможно, систематически выше оценок из литературы, хотя и в пределах нескольких сотых долей звездной величины.

Отклонение скоплений на рис. 6 от биссектрисы может объясняться, в частности, пространственными вариациями закона поглощения или

Таблица 3. Полученная трехмерная карта A_V (полностью дана в электронном виде)

l (градусы)	b (градусы)	R (парсеки)	Окно (градусы)	Число карликов	A_V (зв. вел.)
180.0000	−89.6667	500	0.4	18	0.129
180.0000	−89.6667	450	0.5	16	0.129
180.0000	−89.6667	400	0.5	20	0.129
180.0000	−89.6667	350	0.6	24	0.128
180.0000	−89.6667	300	0.7	17	0.128
180.0000	−89.6667	250	0.8	16	0.128
180.0000	−89.6667	200	1.0	25	0.128
180.0000	−89.6667	150	1.4	18	0.128
180.0000	−89.6667	100	2.0	16	0.078
180.0000	−89.6667	50	4.1	24	0.078
...	...	...	...	...	...

неучтенными вариациями поглощения в поле зрения скопления. Например, NGC 6366 находится всего в 16 угл. мин от яркой звезды пятой величины 47 Ori при радиусе скопления не меньше 9.5 угл. мин (Бика и др., 2019). Под влиянием 47 Ori в NGC 6366 возникает сильный градиент нуль-пункта фотометрических измерений и другие источники систематических ошибок в оценках покраснения/поглощения, описанные Андерсоном и др. (2008) и обнаруженные Бонатто и др. (2013) как большой градиент поглощения в поле NGC 6366. Аналогично, разногласие оценок для NGC 6723 может объясняться тем, что это скопление проецируется на край комплекса облаков Южной Короны (Corona Australis), что вызывает большой градиент поглощения в поле NGC 6723 (Гончаров и др., 2023a), а для NGC 2298 Бонатто и др. (2013) нашли максимальный градиент поглощения среди всех исследованных ими шаровых скоплений, хотя непосредственная причина этого не ясна.

ТРЕХМЕРНЫЕ КАРТЫ

Таблица 3 представляет нашу трехмерную карту A_V . Трехмерная карта A_G вряд ли представляет самостоятельный интерес из-за близости фильтров V и G и получена ради соотношения A_G/A_V , которое может отражать закон поглощения и обсуждается далее.

На рис. 7 показан пример хода A_V с расстоянием для двух лучей зрения в направлении на известные облака в низких (облако в Лебеде) и средних (облако Polaris Flare) широтах. Аналогично, рис. 8 показывает изменения A_V в зависимости

от Z в направлении галактических полюсов. Видно, что наши оценки хорошо воспроизводят исходные оценки из AKQ22, а выравнивание (черные символы) успешно исправило случаи убывания A_V с расстоянием (красные символы), что особенно важно вблизи Солнца.

Для сравнения на рис. 7 и 8 показан ход A_V по оценкам других трехмерных карт и аналитических моделей пространственных вариаций покраснения/поглощения: Гончарова и др. (2022, далее — GMS22) с параметрами, полученными по оценкам AKQ22 для гигантов, AL05, DCL03, G17, GSZ19, GCY21 и LVB22. Дополнительно на рис. 8 цветными крестами показаны оценки при $|Z| = 600$ пк из двумерных карт. Видно, что модель DCL03 откалибрована по карте SFD98: на рис. 8 коричневые кресты находятся точно на концах синих кривых. Отметим, что нулевые или очень низкие оценки в направлении полюсов и вблизи Солнца являются результатом систематических ошибок в случае LVB22 и бедных исходных данных в случае GSZ19, как обсуждалось Гончаровым, Мосенковым (2019, 2021a, 2021b) и в GMS22. Возможно, и для двумерных карт их систематические ошибки являются причиной сравнительно низких оценок A_V в направлении полюсов на рис. 8.

Надо помнить, что эти карты и модели основаны на разных массивах данных. Именно большие различия в исходных оценках привели к огромному различию оценок карт и моделей в направлении полюсов на рис. 8. Следовательно, единственным способом получить надежные оценки покраснения/поглощения в высоких широтах нам представляется получение многочисленных индивидуальных

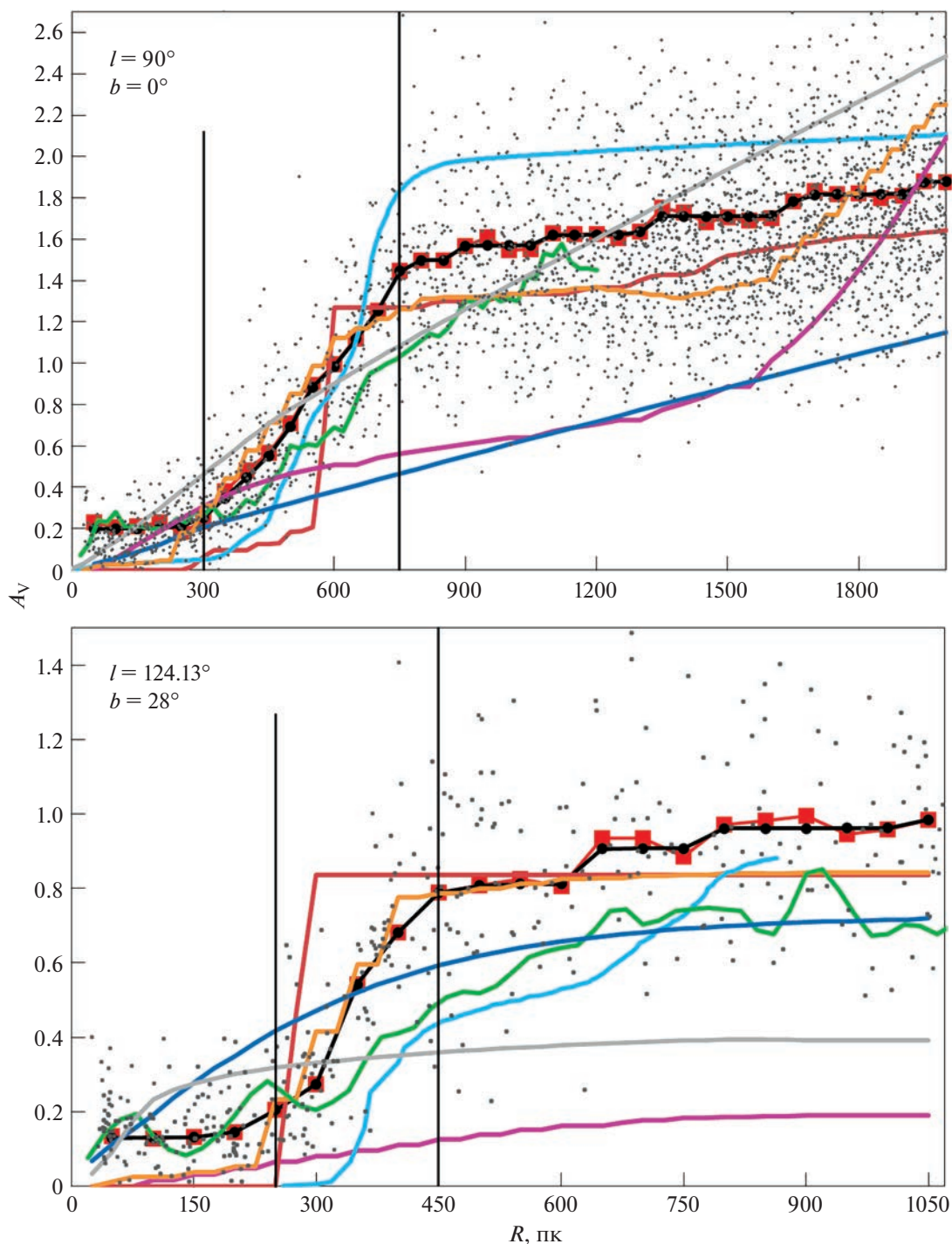


Рис. 7. Поглощение A_V в зависимости от R для двух лучей зрения в направлении облаков Лебедя ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$) и Polaris Flare ($l = 124.13^\circ$, $b = +28^\circ$). Кривыми разного цвета показаны оценки разных карт и моделей: нашей карты до (красный) и после (черный) выравнивания, DCL03 (синий), AL05 (пурпурный), G17 (зеленый), GSZ19 (коричневый), GCU21 (оранжевый), LVB22 (голубой), GMS22 (серый). Отдельными точками показаны использованные нами карлики AKQ22. Вертикальными прямыми показан диапазон расстояний, где происходит существенный рост A_V .

ных оценок для разных объектов-проб (звезд, шаровых скоплений, переменных звезд и т.д.) разными методами.

Все аналитические модели (DCL03, AL05, GMS22) сильно сглаживают вариации A_V как в

тангенциальном, так и в радиальном направлении. Поэтому в случае больших градиентов A_V модели могут сильно недо- или переоценивать A_V на конкретном луче зрения. Кроме того, в моделях DCL03 и AL05 уделено больше внимания далеким от

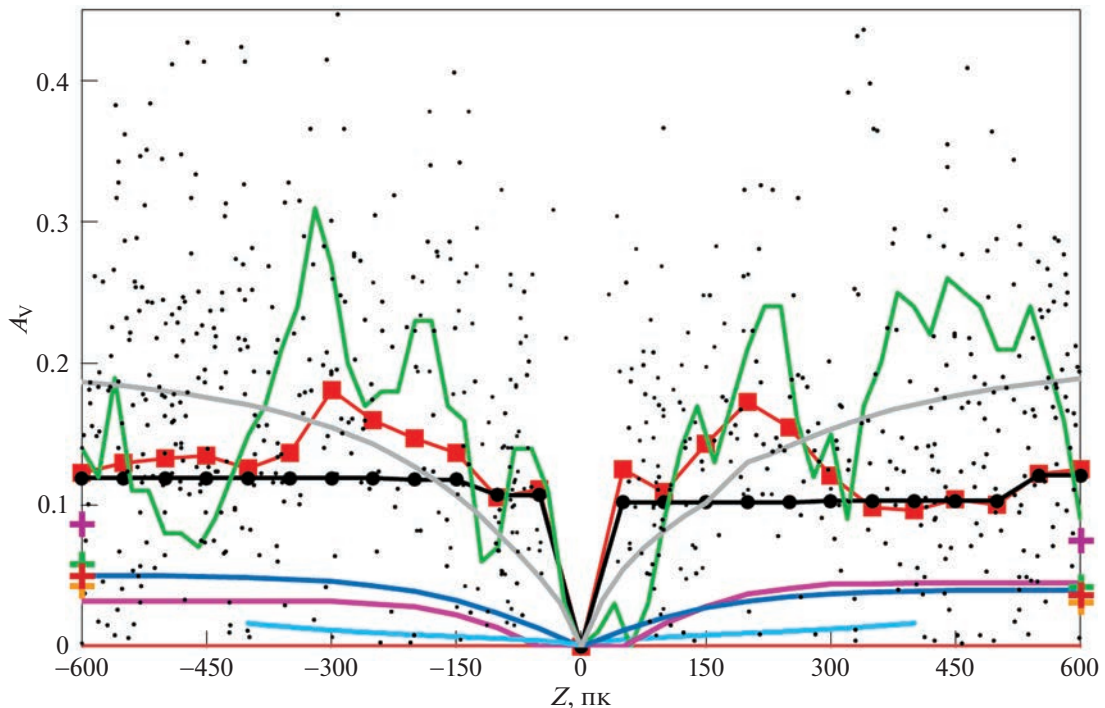


Рис. 8. Поглощение A_V в зависимости от Z в направлении галактических полюсов. Кривыми разного цвета показаны оценки разных карт и моделей: нашей карты до (красный) и после (черный) выравнивания, DCL03 (синий), AL05 (пурпурный), G17 (зеленый), GSZ19 (коричневый), LVB22 (голубой), GMS22 (серый). Цветными крестами при $|Z| = 600$ пк показаны оценки из двумерных карт: SFD98 (коричневый), SF11 (оранжевый), MF15 (зеленый) и TGE (фиолетовый). Отдельными точками показаны использованные нами карлики AKQ22.

Солнца областям Галактики в ущерб ближайшим сотням парсек. Все это видно на рис. 7 и 8.

На рис. 7 видно сравнительно хорошее согласие оценок трехмерных карт G17, GSZ19 и GCY21 между собой и с нашими оценками, в то время как оценки LVB22 отклоняются от остальных. Это согласие позволяет оценить диапазон расстояний, где на данных лучах зрения находятся облака: 300–750 пк для облака в Лебеде и 250–450 пк для Polaris Flare. Эти оценки согласуются с общепринятыми. Таким образом, трехмерная карта может служить материалом для оценки характеристик крупных пылевых облаков.

На рис. 9 показано поглощение A_V по нашей трехмерной карте в зависимости от галактических координат для разных R . Видно, что наша карта успешно воспроизводит пылевые структуры, известные ранее (см. для сравнения, например, рис. 2 из статьи Дэйма и др., 2001, рис. 1–3 из GSZ19 и рис. 12 из AKQ22). При этом в соответствии с GMS22 в диапазоне $100 < R < 500$ пк большой вклад дают облака пояса Гудла (наиболее заметные около $l \approx 0^\circ$, $b \approx +20^\circ$ и $l \approx 180^\circ$, $b \approx -20^\circ$), в диапазоне $300 < R < 1000$ пк — облака недавно отмеченного в GMS22 пылевого слоя Цефея—

Хамелеона (наиболее заметные около $l \approx 135^\circ$, $b \approx +15^\circ$ и $l \approx 300^\circ$, $b \approx -20^\circ$), а при $R > 1000$ пк растет влияние экваториального слоя пыли.

На рис. 9 показано, что область $R < 100$ пк, т.е. Местный Пузырь, существенно отличается от более далеких областей сравнительно малыми градиентами поглощения и довольно равномерным ростом поглощения с расстоянием. В результате уже в пределах 100 пк от Солнца почти отсутствуют области неба с $A_V < 0.1$, как видно из рис. 9. При этом во многих высокоширотных областях неба поглощение сохраняется на уровне $A_V \approx 0.1$ при $R > 100$ пк. Таким образом, в Пузыре поглощение растет в среднем на $A_V/R \approx 0.1/0.1 = 1$ звездную величину на кпк, т.е. не меньше, чем во многих более далеких областях. Это видно на карте дифференциального поглощения A_V/R вдоль луча зрения (т.е. пространственной плотности распределения пыли), которую мы получили на основе нашей трехмерной карты A_V . Эта карта представлена в табл. 4. Для примера дифференциальное поглощение вдоль луча зрения (в звездных величинах на кпк) в основной плоскости Галактики показано на рис. 10. Его можно сравнить с аналогичным рис. 3 из LVB22 и сделать вывод, что такая

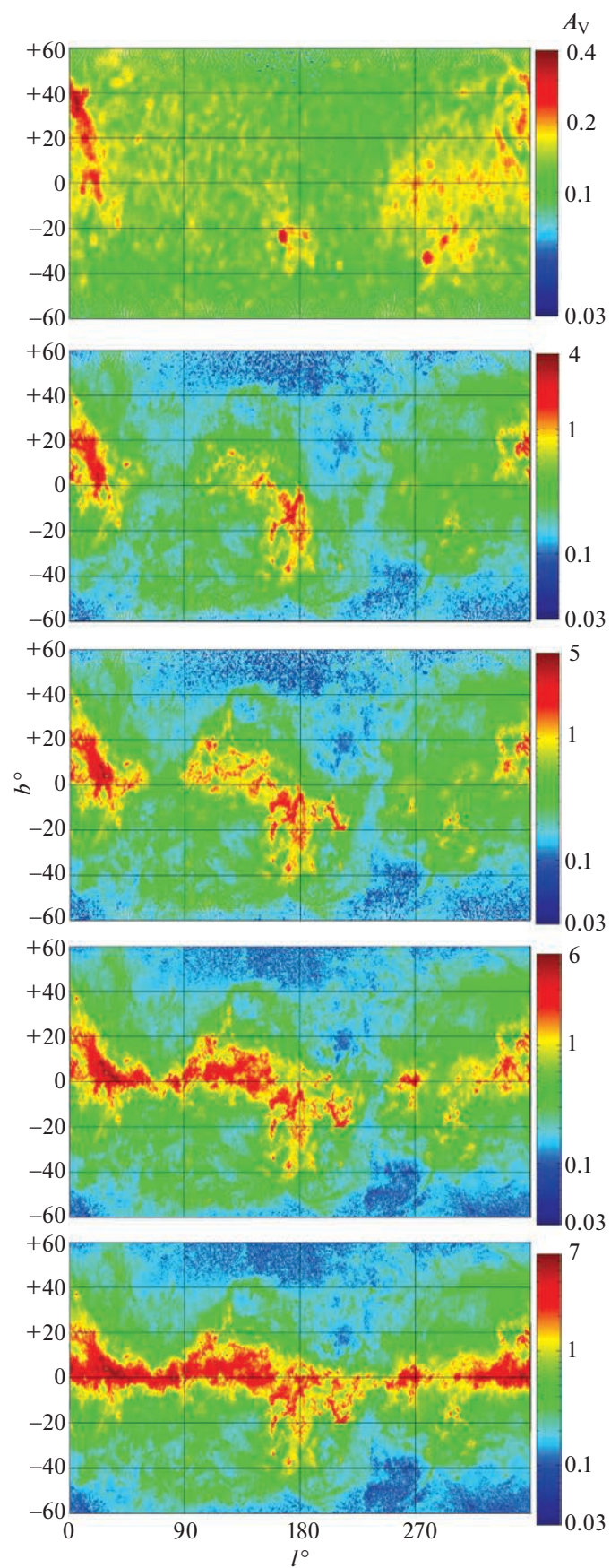


Рис. 9. Вариации поглощения A_V по небу до (сверху вниз) $R = 100, 300, 500, 1000$ и 1650 пк.

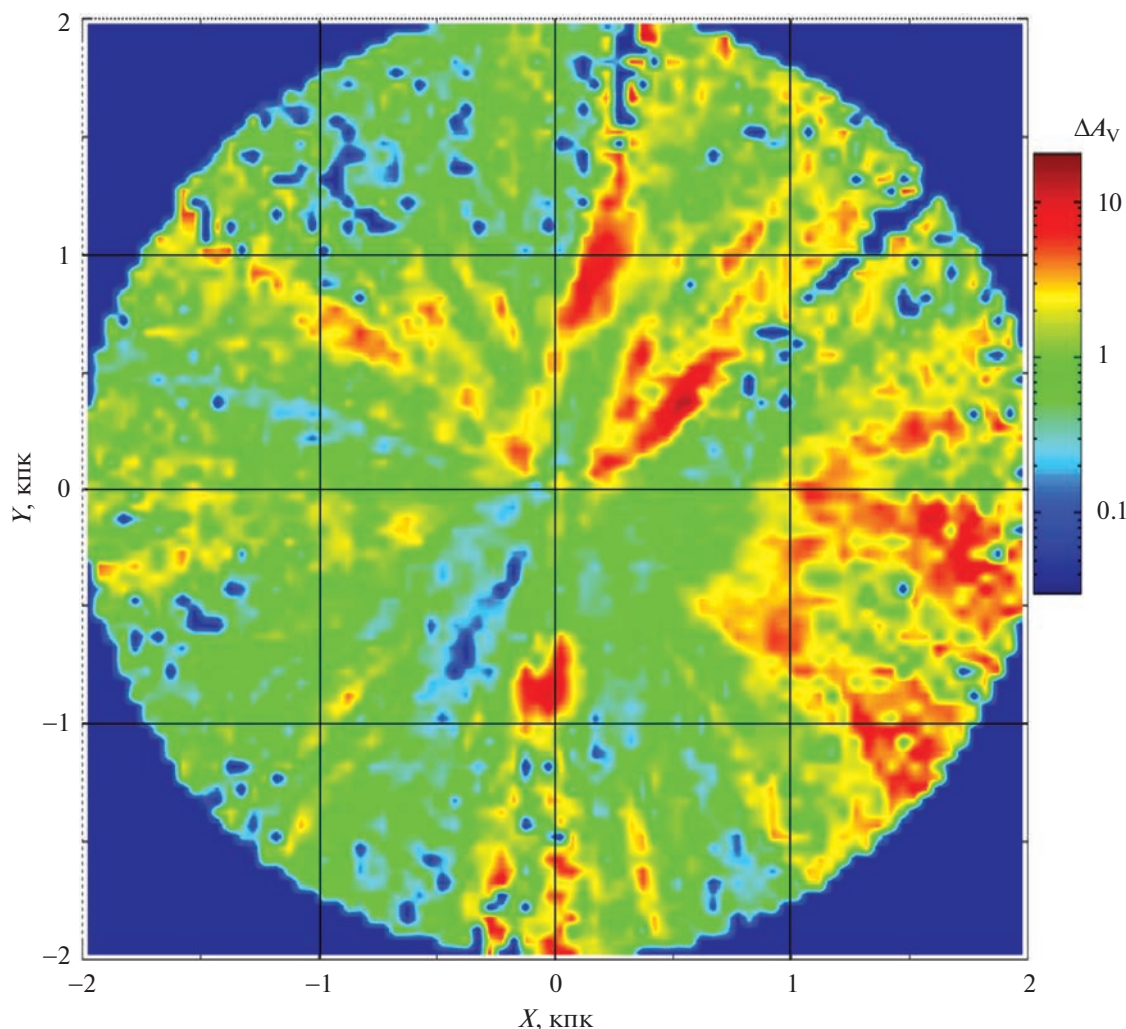


Рис. 10. Дифференциальное поглощение вдоль луча зрения (в звездных величинах на килопарсек) в основной плоскости Галактики по оценкам из нашей карты.

карта дифференциального поглощения позволяет увидеть крупные пылевые облака. Ближайшая к Солнцу область пониженного дифференциального поглощения на рис. 10 видна в третьем квадранте на расстоянии более 100 пк от Солнца, а не вокруг Солнца. Эти результаты полностью согласуются с описанием Местного Пузыря Гончаровым, Мосенковым (2019) как области обычной плотности, но повышенной ионизации среды, где, соответственно, отсутствует текущее звездообразование. Такой взгляд на Пузырь еще раз ставит под сомнение все низкие оценки $A_V < 0.1$ в высоких широтах, показанные, например, на рис. 8.

Данные АКQ22 позволяют проанализировать пространственные вариации закона поглощения. Для этого мы использовали оценки поглощения A_V в фильтре V и поглощения A_G в фильтре Gaia G из АКQ22, модифицировав последние оценки. Для оценок A_V АКQ22 и мы вслед за ними

приняли закон поглощения Шлафли и др. (2016), а для модификации оценок A_G мы использовали влияние вариаций реального закона поглощения на оценки эффективной температуры, полученные АКQ22, как отмечено в их разделе “D.3. Variations in the extinction law induce systematic effective temperature shifts”. При этом мы воспользовались тем, что рассматриваемые нами карлики главной последовательности демонстрируют надежно определяемое среднее соотношение между эффективной температурой и нормальным цветом. Анализ и учет этого соотношения по данным АКQ22 позволили нам вычислить A_G как покраснение $E(G - W2)$ в предположении о пренебрежимо малом поглощении в ИК-фильтре WISE $W2$ с эффективной длиной волны 4.6 микрона. Таким образом, модифицированные оценки A_G свободны от предположения о законе поглощения. Поэтому пространственные вариации соотношения A_G/A_V

Таблица 4. Полученная трехмерная карта дифференциального поглощения A_V/R вдоль луча зрения (полностью дана в электронном виде)

l (градусы)	b (градусы)	R (парсеки)	A_V/R (зв. вел. на кпк)
180.0000	−89.6667	475	0.000
180.0000	−89.6667	425	0.000
180.0000	−89.6667	375	0.020
180.0000	−89.6667	325	0.000
180.0000	−89.6667	275	0.000
180.0000	−89.6667	225	0.000
180.0000	−89.6667	175	0.000
180.0000	−89.6667	125	1.000
180.0000	−89.6667	75	0.000
180.0000	−89.6667	25	1.560
...	...	...	...

должны отражать реальные пространственные вариации закона поглощения. Отметим, что мы не исправили оценки A_V за систематику по уравнениям (1) и (2), предполагая ту же систематику в оценках A_G и, следовательно, ничтожное влияние этой систематики на соотношение A_G/A_V .

Однако этот подход дает надежные результаты только в пространственных ячейках с большим числом звезд. Поэтому полученная карта вариаций A_G/A_V имеет меньшую относительную точность, худшее фактическое разрешение (хотя формальное разрешение то же) и охватывает меньшее пространство $R < 800$ пк, чем наша трехмерная карта A_V . Пример найденных нами вариаций A_G/A_V в зависимости от l и b в радиусе 800 пк от Солнца показан на рис. 11. Важно, что рассматриваемые оценки A_V и A_G различаются не столько из-за разницы между фильтрами V и G , сколько из-за разницы в учете закона поглощения. Поэтому полученное соотношение A_G/A_V вряд ли можно однозначно пересчитать в R_V . Однако диапазон $0.80 < A_G/A_V < 0.89$ примерно соответствует диапазону $2 < R_V < 4$.

На рис. 11 видны значительные вариации закона поглощения как с l , так и с b . Найденные вариации в целом согласуются с теми, что найдены Гончаровым (2012а, 2013, 2016а), включая области больших значений A_G/A_V в высоких широтах. Особенно примечательна на нашей карте обширная

область пониженного значения A_G/A_V примерно между точками $l \approx 130^\circ$, $b \approx +10^\circ$ и $l \approx 200^\circ$, $b \approx -15^\circ$, которая ранее была найдена Шлафли и др. (2016, 2017). Таким образом, в дальнейшем возможен более подробный плодотворный анализ пространственных вариаций закона поглощения на основе данных АКQ22 и будущих данных Gaia.

РАССЕЯННЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Сравнение в разделе “Двумерные карты” и на рис. 6 предсказаний нашей двумерной карты для шаровых скоплений с оценками из литературы дает однозначные результаты, так как шаровые скопления находятся заведомо за пределами галактического слоя пыли и имеют пренебрежимо малую концентрацию пыли внутри себя. Использование других объектов-проб (рассеянные скопления, известные пылевые облака, переменные звезды, сверхгиганты и т.д.) требует отдельного исследования, т.к. неопределенности характеристик этих объектов (например, расстояний) существенны и делают результаты сравнения неоднозначными. Чтобы показать возникающие проблемы, мы ограничились сравнением нашей трехмерной карты с некоторыми наиболее точными, на наш взгляд, оценками поглощения для рассеянных скоплений в радиусе 2 кпк от Солнца.

На рис. 12 показано хорошее согласие предсказаний нашей модели с оценками поглощения из Ниу и др. (2020), Монтейро и др. (2020), Хе и др. (2021) и Джексона и др. (2022), полученными разными методами, но без привлечения карт и моделей покраснения/поглощения. Для оценок Хе и др. (2021) принята неопределенность $\sigma(A_V) = 0.25$, неопределенности остальных оценок предоставлены их авторами. Как и для шаровых скоплений на рис. 6, рассеянные скопления на рис. 12 показывают, что, возможно, наша карта переоценивает малые и недооценивает большие поглощения. Однако этот тренд лучше виден на рис. 13, где показаны разности между нашими оценками поглощения и оценками из литературы в зависимости от расстояния. Возможно, для далеких скоплений этот тренд объясняется селекцией в пользу членов скопления с меньшим поглощением, когда члены с большим поглощением слишком слабы для наблюдения.

Только пять скоплений показывают сильное расхождение предсказаний карты и оценок из литературы: NGC 1977, NGC 1980 и Orion Trapezium-FG (Монтейро и др., 2020), NGC 2264 и ρ Oph (Джексон и др., 2022). Эти скопления занимают малую часть пространства внутри крупных газопылевых облаков с областями текущего звездообразования и большими градиентами поглощения. Характеристики этих скоплений активно уточняются, но все еще известны с большой неопределенностью. Например, благодаря обнаружению новых

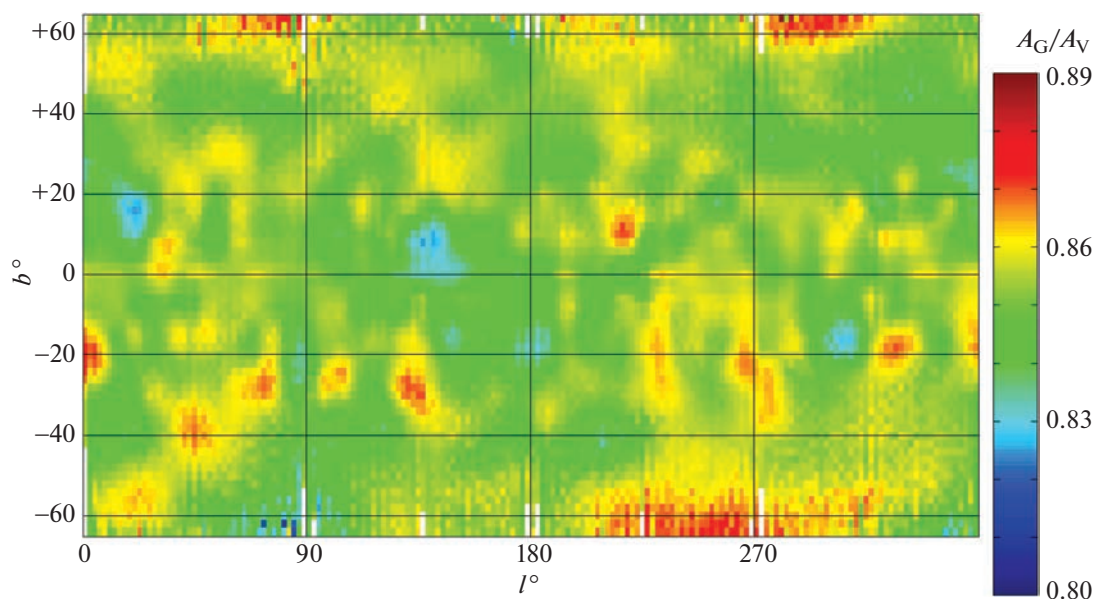


Рис. 11. Вариации соотношения A_G/A_V по небу в пределах 800 пк от Солнца.

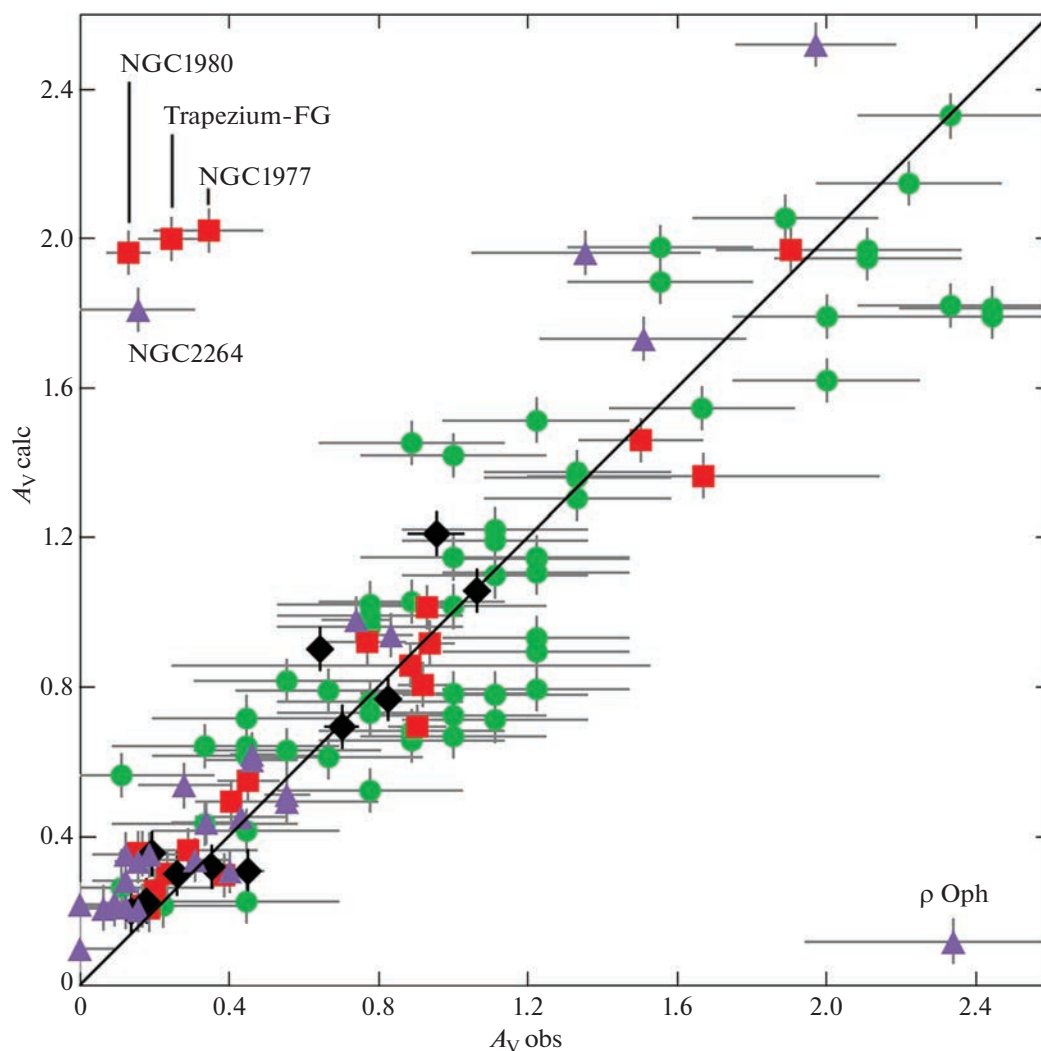


Рис. 12. Оценки A_V для рассеянных скоплений из литературы в сопоставлении с предсказаниями нашей трехмерной карты: из Ниу и др. (2020) — черные ромбы, Монтейро и др. (2020) — красные квадраты, Хе и др. (2021) — зеленые круги, Джексон и др. (2022) — фиолетовые треугольники.

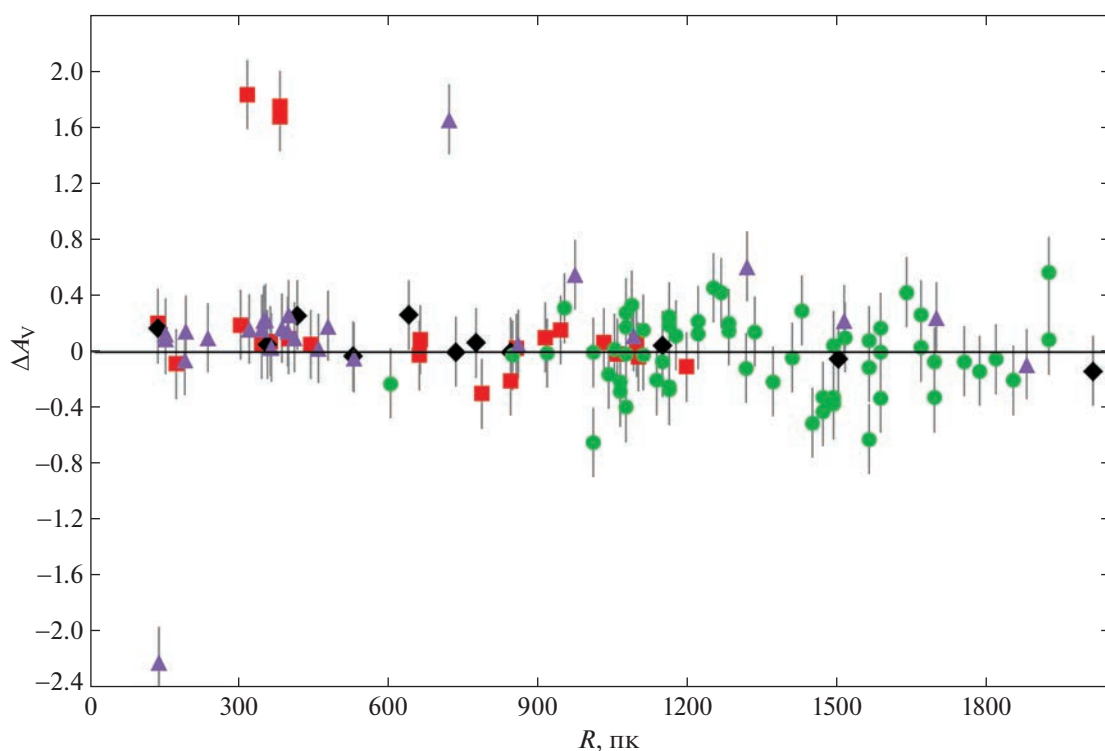


Рис. 13. Разность между оценками A_V из нашей трехмерной карты и оценками из литературы для рассеянных скоплений в зависимости от расстояния. Обозначения те же, что на рис. 12.

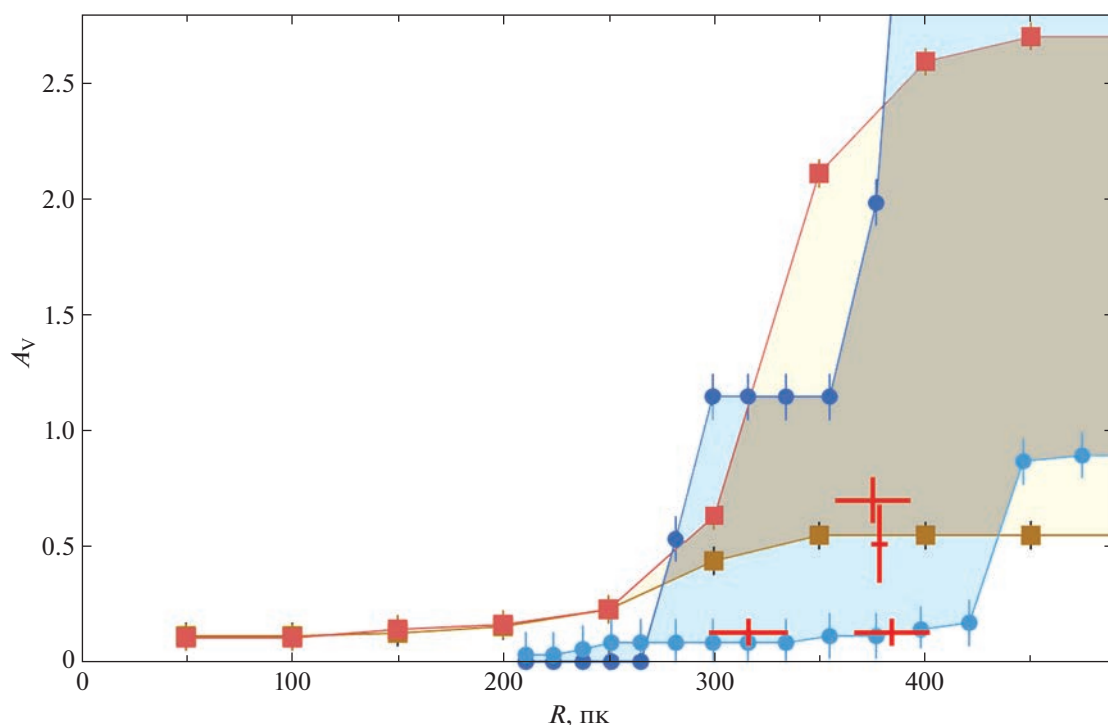


Рис. 14. Зависимость A_V от расстояния в поле зрения скопления NGC 1980, показанная коричневыми квадратами разного оттенка для двух лучей зрения с экстремальными оценками из нашей трехмерной карты, синими кругами разного оттенка для двух лучей зрения с экстремальными оценками из карты GSZ19, красными крестами, размер которых отражает декларируемые авторами неопределенности, для независимых оценок из Кантат-Годэна и др. (2020), Хант, Рефферт (2023) и двух оценок разными методами из Монтейро и др. (2020). Промежуточные оценки из нашей карты и GSZ19 на других лучах зрения в поле NGC 1980 заполняют области, тонированные соответствующим цветом.

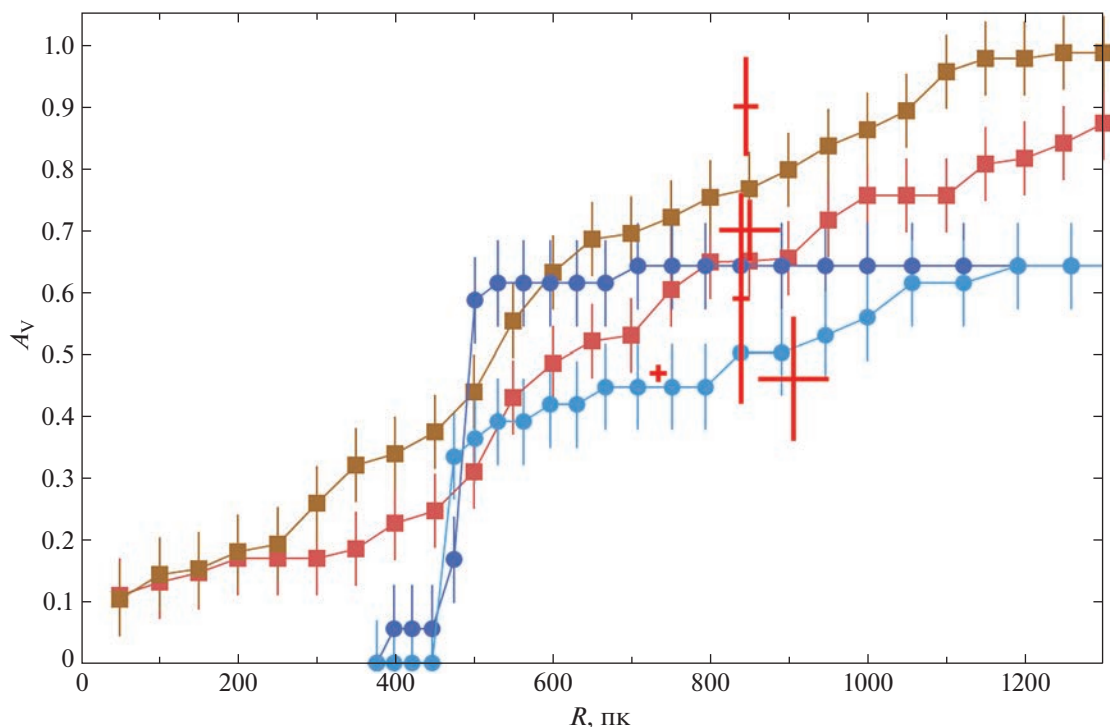


Рис. 15. Зависимость A_V от расстояния в поле зрения скопления NGC 2168, показанная коричневыми квадратами разного оттенка для двух лучей зрения из нашей трехмерной карты, синими кругами разного оттенка для двух лучей зрения из карты GSZ19, красными крестами, размер которых отражает декларируемые авторами неопределенности, для 5 независимых оценок из Боссини и др. (2019), Кантат-Годэна и др. (2020), Ниу и др. (2020), Монтейро и др. (2020) и Хант, Рефферт (2023).

членов, оценка радиуса NGC 1980 изменилась за последние годы почти в 10 раз: с 7.5 до 72 угл. мин (8 пк) по результатам Бики и др. (2019) и Хант, Рефферт (2023) соответственно. При новой оценке радиуса NGC 1980 наши карты дают множество оценок поглощения в его поле, и большие градиенты поглощения становятся очевидны. На рис. 14 показана зависимость A_V от расстояния R для двух лучей зрения в поле NGC 1980 с экстремальными оценками A_V по данным нашей трехмерной карты и карты GSZ19. Разнообразные промежуточные оценки на других лучах зрения в поле NGC 1980, не показанные ради ясности рисунка, заполняют на рис. 14 области, тонированные соответствующим цветом. Для сравнения показаны независимые оценки из литературы. Из рис. 14 видно, что в поле NGC 1980 можно найти лучи зрения, на которых оценки карт согласуются хотя бы с какой-нибудь оценкой из литературы. А все разнообразие оценок, видимо, вызвано большими градиентами поглощения в поле NGC 1980. Это относится ко всем пяти упомянутым скоплениям.

Градиенты поглощения в поле зрения остальных скоплений сравнительно малы, как показывает, например, рис. 15 для NGC 2168. В результате этого оценки из нашей карты и GSZ19 согласуются с оценками из литературы не хуже,

чем те между собой. Возможно, что при таком существенном разногласии оценок из литературы оценки из нашей и других трехмерных карт покраснения/поглощения могут использоваться для уточнения оценок расстояния и поглощения некоторых рассеянных скоплений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании мы использовали индивидуальные оценки расстояния и межзвездного поглощения для примерно 100 миллионов карликов из AKQ22, базирующиеся на параллаксах Gaia DR3 и фотометрии Gaia, Pan-STARRS1, SkyMapper, 2MASS и WISE. В результате мы построили пять карт: 1) трехмерную карту межзвездного поглощения A_V в фильтре V , 2) трехмерную карту поглощения A_G в фильтре Gaia G , 3) трехмерную карту дифференциального поглощения A_V/R вдоль луча зрения — все в радиусе 2 кпк вокруг Солнца с разрешением 50 пк вдоль и от 3.6 до 11.6 пк поперек луча зрения; 4) трехмерную карту вариаций соотношения A_G/A_V в радиусе 800 пк от Солнца и 5) двумерную карту полного галактического поглощения A_V сквозь весь полуслой пыли в Галактике от Солнца до внегалактического

пространства с угловым разрешением 6.1 угл. мин для галактических широт $|b| > 13^\circ$.

В оценках АКQ22 нами найдена и учтена систематическая ошибка поглощения в зависимости от расстояния. Тем не менее оценки АКQ22, видимо, являются наиболее точными массовыми оценками индивидуальных поглощений звезд на основе результатов Gaia и современных обзоров неба. Поэтому в нашем исследовании данные АКQ22 особенно важны как прототип будущих результатов Gaia.

При создании карт мы уделили особое внимание пространству в пределах 200 пк от Солнца и высоким галактическим широтам как областям, где оценки поглощения до сих пор имели большую относительную неопределенность. Наши карты оценивают поглощение внутри галактического слоя пыли от Солнца до протяженного объекта или сквозь весь полуслой пыли от Солнца до внегалактического пространства с точностью около $\sigma(A_V) = 0.06$ звездной величины. Это дает высокую относительную точность оценок поглощения даже в высоких галактических широтах, где medianное полное галактическое поглощение от Солнца до внегалактических объектов по нашим оценкам составляет $A_V = 0.12 \pm 0.06$ звездной величины. Точность предсказаний наших карт для точечного объекта зависит от естественных флуктуаций пылевой среды и составляет от $\sigma(A_V) = 0.08$ около галактических полюсов до $\sigma(A_V) = 0.34$ вблизи галактического экватора. Мы показали, что представленные карты являются одними из лучших по объему использованных данных, размеру рассматриваемого пространства, разрешению, точности и другим свойствам.

Наши карты могут использоваться для калибровки двумерных карт ИК-эмиссии, для оценки плотности и расстояния до крупных пылевых облаков (примеры даны на рис. 7), а также для уточнения характеристик звездных скоплений и других объектов. Наша двумерная карта полезна как источник оценок полного галактического поглощения до около- и внегалактических объектов, включая шаровые скопления, галактики, квазары и сверхновые Ia. И, наоборот, объекты с независимыми точными оценками поглощения и расстояния могут использоваться в качестве проб для проверки точности предсказаний наших карт.

Благодарим рецензентов за полезные замечания.

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 20-72-10052). В этом исследовании использованы: ресурсы Страсбургского центра астрономических данных (<http://cdsweb.u-strasbg.fr>), включая базу данных SIMBAD и сервис X-Match;

система онлайн визуализации данных Filtergraph (Бурпер и др., 2013, <https://filtergraph.com>); результаты миссии Gaia Европейского Космического агентства (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>); данные Wide-field Infrared Survey Explorer — совместного проекта University of California, Los Angeles и Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology; данные проекта SkyMapper Southern Sky Survey, принадлежащего и управляемого Australian National University's Research School of Astronomy and Astrophysics; данные Two Micron All Sky Survey, который является совместным проектом University of Massachusetts и Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, финансируемые National Aeronautics and Space Administration и National Science Foundation; данные обзора Pan-STARRS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аморес, Лепине (E.B. Amôres and J.R.D. Lépine), *Astron. J.* **130**, 659 (2005).
2. Андерс и др. (F. Anders, A. Khalatyan, A.B.A. Queiroz, C. Chiappini, J. Ardévol, L. Casamiquela, F. Figueras, Ó. Jiménez-Arranz, C. Jordi, et al.), *Astron. Astrophys.* **658**, A91 (2022).
3. Андерсон и др. (J. Anderson, A. Sarajedini, L.R. Bedin, I.R. King, G. Piotto, I.N. Reid, M. Siegel, S.R. Majewski, N.E.Q. Paust, et al.), *Astron. J.* **135**, 2055 (2008).
4. Баумгардт, Васильев (H. Baumgardt and E. Vasiliev), *MNRAS* **505**, 5957 (2021).
5. Беллаццини и др. (M. Bellazzini, F.R. Ferraro, and R. Ibata), *Astron. J.* **124**, 915 (2002).
6. Берри и др. (M. Berry, Z. Ivezić, B. Sesar, M. Jurić, E.F. Schlafly, J. Bellovary, D. Finkbeiner, D. Vrbanec, T.C. Beers, et al.), *Astrophys. J.* **757**, 166 (2012).
7. Бика и др. (E. Bica, D.B. Pavani, C.J. Bonatto, and E.F. Lima), *Astron. J.* **157**, 12 (2019).
8. Бонатто и др. (C. Bonatto, F. Campos, and S.O. Kepler), *MNRAS* **435**, 263 (2013).
9. Боссини и др. (D. Bossini, A. Vallenari, A. Bragaglia, T. Cantat-Gaudin, R. Sordo, L. Balaguer-Núñez, C. Jordi, A. Moitinho, C. Soubiran, et al.), *Astron. Astrophys.* **623**, A108 (2019).
10. Бреccан и др. (A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni), *MNRAS* **427**, 127 (2012).
11. Бурпер и др. (D. Burger, K.G. Stassun, J. Pepper, R.J. Siverd, M. Paegert, N.M. De Lee, and W.H. Robinson), *Astron. Comput.* **2**, 40 (2013).
12. Вагнер-Кайзер и др. (R. Wagner-Kaiser, D.C. Stenning, A. Sarajedini, T. von Hippel, D.A. van Dyk, E. Robinson, N. Stein, and W.H. Jefferys), *MNRAS* **463**, 3768 (2016).

13. Вагнер-Кайзер и др. (R. Wagner-Kaiser, A. Sarajedini, T. von Hippel, D.C. Stenning, D.A. van Dyk, E. Jeffery, E. Robinson, N. Stein, J. Anderson, and W.H. Jefferys), *MNRAS* **468**, 1038 (2017).
14. Гайя (Gaia collaboration), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021a).
15. Гайя (Gaia collaboration), *Astron. Astrophys.* **649**, A3 (2021b).
16. Гайя (Gaia collaboration), *Astron. Astrophys.* **649**, A4 (2021в).
17. Гайя (Gaia collaboration), *Astron. Astrophys.* **674**, A31 (2023).
18. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **34**, 868 (2008) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **34**, 785 (2008)].
19. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **35**, 862 (2009) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **35**, 780 (2009)].
20. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **37**, 769 (2011) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **37**, 707 (2011)].
21. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 15 (2012a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 12 (2012a)].
22. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 108 (2012b) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 87 (2012b)].
23. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 776 (2012в) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 694 (2012c)].
24. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **39**, 620 (2013) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **39**, 550 (2013)].
25. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **42**, 494 (2016a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **42**, 445 (2016a)].
26. Гончаров Г.А., *Астрофизика* **59**, 617 (2016b) [G.A. Gontcharov, *Astrophysics* **59**, 548 (2016b)].
27. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 521 (2017) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **43**, 472 (2017)].
28. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **45**, 650 (2019) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **45**, 605 (2019)].
29. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **470**, L97 (2017a).
30. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **472**, 3805 (2017b).
31. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **475**, 1121 (2018).
32. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **483**, 299 (2019).
33. Гончаров и др. (G.A. Gontcharov, A.V. Mosenkov, and M.Yu. Khovritchev), *MNRAS* **483**, 4949 (2019).
34. Гончаров и др. (G.A. Gontcharov, M.Yu. Khovritchev, and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **497**, 3674 (2020).
35. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **500**, 2590 (2021a).
36. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **500**, 2607 (2021b).
37. Гончаров и др. (G.A. Gontcharov, M.Yu. Khovritchev, A.V. Mosenkov, V.B. Il'in, A.A. Marchuk, S.S. Savchenko, A.A. Smirnov, P.A. Usachev, and D.M. Poliakov), *MNRAS* **508**, 2688 (2021).
38. Гончаров Г.А., Мосенков А.В., Савченко С.С., Ильин В.Б., Марчук А.А., Смирнов А.А., Усачев П.А., Поляков Д.М., Хебдон Н., Письма в Астрон. журн. **48**, 696 (2022) [G.A. Gontcharov, A.V. Mosenkov, S.S. Savchenko, V.B. Il'in, A.A. Marchuk, A.A. Smirnov, P.A. Usachev, D.M. Polyakov, and N. Hebdon, *Astron. Lett.* **48**, 578 (2022)].
39. Гончаров и др. (G.A. Gontcharov, M.Yu. Khovritchev, A.V. Mosenkov, V.B. Il'in, A.A. Marchuk, D.M. Poliakov, O.S. Ryutina, S.S. Savchenko, A.A. Smirnov, et al.), *MNRAS* **518**, 3036 (2023a).
40. Гончаров и др. (G.A. Gontcharov, O.S. Ryutina, S.S. Savchenko, A.V. Mosenkov, V.B. Il'in, M.Yu. Khovritchev, A.A. Marchuk, D.M. Poliakov, A.A. Smirnov, et al.), *MNRAS* **526**, 5628 (2023b).
41. 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).
42. Грин и др. (G.M. Green, E.F. Schlafly, C. Zucker, J.S. Speagle, and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **887**, 93 (2019).
43. Гуо и др. (H.-L. Guo, B.-Q. Chen, H.-B. Yuan, Y. Huang, D.-Z. Liu, Y. Yang, X.-Y. Li, W.-X. Sun, and X.-W. Liu), *Astrophys. J.* **906**, 47 (2021).
44. Джексон и др. (R.J. Jackson, R.D. Jeffries, N.J. Wright, S. Randich, G. Sacco, A. Bragaglia, A. Hourihane, E. Tognelli, S. Degl'Innocenti, et al.), *MNRAS* **509**, 1664 (2022).
45. Доттер и др. (A. Dotter, A. Sarajedini, and J. Anderson), *Astrophys. J.* **738**, 74 (2011).
46. Дриммель и др. (R. Drimmel, A. Cabrera-Lavers, and M. López-Corredoira), *Astron. Astrophys.* **409**, 205 (2003).
47. Дэйм и др. (T.M. Dame, Dap Hartmann, and P. Thaddeus), *Astrophys. J.* **547**, 792 (2001).
48. Жирарди и др. (L. Girardi, M.A. T. Groenewegen, E. Hatziminaoglou, and L. Da Costa), *Astron. Astrophys.* **436**, 895, (2005).
49. Кантат-Годэн и др. (T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, C. Jordi, M. Romero-Gómez, C. Soubiran, L. Casamiquela, Y. Tarricq, A. Moitinho, et al.), *Astron. Astrophys.* **640**, A1, (2020).
50. Карделли и др. (J.A. Cardelli, G.C. Clayton, and J.S. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
51. Касагранде, Вандэнберг (L. Casagrande and D.A. Vandenberg), *MNRAS* **444**, 392 (2014).
52. Клементини и др. (G. Clementini, V. Ripepi, A. Garofalo, R. Molinaro, T. Muraveva, S. Leccia, L. Rimoldini, B. Holl, G. Jevardat de Fombelle, et al.), *Astron. Astrophys.* **674**, A18 (2023).
53. Кох, МакВильям (A. Koch and A. McWilliam), *Astron. Astrophys.* **565**, A23 (2014).

54. Кюироз и др. (A.B.A. Queiroz, F. Anders, B.X. Santiago, C. Chiappini, M. Steinmetz, M. Dal Ponte, K.G. Stassun, L.N. da Costa, M.A.G. Maia, et al.), *MNRAS* **476**, 2556 (2018).
55. Лаллемент и др. (R. Lallement, J.L. Vergely, C. Babusiaux, and N.L.J. Cox), *Astron. Astrophys.* **661**, A147 (2022).
56. Майснер, Финкбайнер (A.M. Meisner and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **798**, 88 (2015).
57. Монтейро и др. (H. Monteiro, W.S. Dias, A. Moitinho, T. Cantat-Gaudin, J.R.D. Lépine, G. Carraro, and E. Paunzen), *MNRAS* **499**, 1874 (2020).
58. Ниу и др. (H. Niu, J. Wang, and J. Fu), *Astrophys. J.* **903**, 93 (2020).
59. Онкен и др. (C.A. Onken, C. Wolf, M.S. Bessell, S.-W. Chang, G.S. Da Costa, L.C. Luvaul, D. Mackey, B.P. Schmidt, and L. Shao), *Publ. Astron. Soc. Australia* **36**, 33 (2019).
60. Панопулу и др. (G.V. Panopoulou, S.E. Clark, A. Nacar, F. Heitsch, J. Kainulainen, E. Ntormousi, D. Seifried, and R.J. Smith), *Astron. Astrophys.* **663**, C1, (2022).
61. Райт и др. (E.L. Wright, et al.), *Astrophys. J.* **140**, 1868 (2010).
62. Рецио-Бланко и др. (A. Recio-Blanco, G. Piotto, F. De Angeli, S. Cassisi, M. Riello, M. Salaris, A. Pietrinferni, M. Zoccali, and A. Aparicio), *Astron. Astrophys.* **432**, 851, (2005).
63. Скрутские и др. (M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M.D. Weinberg, S. Schneider, J.M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, et al.), *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
64. Хамрик и др. (P. Hamrick, A. Bansal, and K. Tock), *J. American Associat. Var. Star Observ.* **49**, 192 (2021).
65. Хант, Рефферт (E.L. Hunt and S. Reffert), *Astron. Astrophys.* **673**, A114, (2023).
66. Харрис (W.E. Harris), *Astron. J.* **112**, 1487 (1996).
67. Хе и др. (Z.-H. He, Y. Xu, C.-J. Hao, Z.-Y. Wu, and J.-J. Li), *Res. Astron. Astrophys.* **21**, (93).
68. Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, L. Denneau, P.W. Draper, D. Farrow, et al.), arXiv:1612.05560 (2016).
69. Шлафли, Финкбайнер (E.F. Schlafly and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
70. Шлафли и др. (E.F. Schlafly, A.M. Meisner, A.M. Stutz, J. Kainulainen, J.E.G. Peek, K. Tchernyshyov, H.-W. Rix, D.P. Finkbeiner, K.R. Covey, et al.), *Astrophys. J.* **821**, 78 (2016).
71. Шлафли и др. (E.F. Schlafly, J.E.G. Peek, D.P. Finkbeiner, and G.M. Green), *Astrophys. J.* **838**, 36 (2017).
72. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkbeiner, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).