

ТРЕХМЕРНАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В БЛИЖАЙШЕМ КИЛОПАРСЕКЕ

© 2022 г. Г. А. Гончаров^{1*}, А. В. Мосенков^{2,1}, С. С. Савченко^{1,3,4}, В. Б. Ильин^{1,3,5}, А. А. Марчук^{1,3}, А. А. Смирнов^{1,3}, П. А. Усачев^{1,3,4}, Д. М. Поляков^{1,3}, Н. Хебдон²

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

²Department of Physics and Astronomy, Brigham Young University, Provo, USA

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

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

Поступила в редакцию 21.06.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.; принята к публикации 05.10.2022 г.

Представлена новая версия нашей аналитической модели пространственных вариаций межзвездного поглощения в ближайшем к Солнцу килопарсеке. Эта модель рассматривает трехмерное распределение пыли как наложение трех пересекающихся слоев: 1) слоя вдоль основной плоскости Галактики, 2) слоя в поясе Гулда и 3) слоя, проходящего через комплексы пылевых облаков в Цефее и Хамелеоне. В каждом слое пространственная плотность пыли экспоненциально убывает с удалением от основной плоскости слоя. Кроме того, вдоль основной плоскости каждого слоя имеются синусоидальные долготные вариации поглощения. Наиболее вероятные значения 29 параметров нашей модели найдены с использованием четырех наборов данных: трехмерных карт покраснения звезд Гончарова-2017, Лаллемент-2019 и Грина-2019, а также полученных Андерсом поглощений для 993 291 гиганта из Gaia Early Data Release 3. Все данные дают схожие оценки параметров модели. Поглощение для звезды или точки пространства предсказывается нашей моделью с точностью от $\sigma(A_V) = 0.07$ до 0.37 для высоких и низких галактических широт соответственно. В этих величинах доминируют естественные флуктуации пылевой среды. Среднее поглощение для протяженного объекта (галактики, звездного скопления, пылевого облака) или малой области пространства при игнорировании флуктуаций среды предсказывается моделью с точностью от $\sigma(A_V) = 0.04$ до 0.15 для высоких и низких галактических широт соответственно. Грин-2019 и Андерс-2022 согласованно дают для поглощения в высоких широтах поперек всего полуслоя галактической пыли над или под Солнцем оценку $A_V = 0.12^m$ при естественных флуктуациях среды $\sigma(A_V) = 0.06^m$. Если столь высокая оценка подтвердится впоследствии, она потребует объяснить, как значительное количество пыли оказалось вдали от основной плоскости Галактики. Наша модель является шагом в таком объяснении.

Ключевые слова: галактические окрестности Солнца; межзвездное поглощение; индивидуальные объекты: пояс Гулда; индивидуальные объекты: комплекс облаков в Цефее; местная межзвездная среда.

DOI: 10.31857/S0320010822100035

ВВЕДЕНИЕ

Покраснение звезды или межзвездное поглощение между наблюдателем и звездой обычно определяется из ее спектрального распределения энергии на основе фотометрических, астрометрических, спектральных и иных наблюдений. Например, недавно индивидуальные оценки поглощения для миллионов звезд получены Андерсом и др. (2022,

далее — АКQ22)¹ на основе фотометрии и астрометрии из Gaia Early Data Release 3 (EDR3; Гая, 2021а) в комбинации с фотометрией из других обзоров неба.

Индивидуальные оценки покраснения/поглощения имеются или могут быть получены не для каждого объекта. Для обеспечения ими любого

*Электронный адрес: georgegontcharov@yahoo.com

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

объекта, без знания его характеристик, анализируется зависимость покраснения/поглощения от галактических координат — долготы l , широты b и расстояния R от Солнца. При этом оценка для рассматриваемой точки пространства фактически вычисляется на основе индивидуальных оценок для звезд вблизи этой точки. В результате создаются трехмерные карты покраснения/поглощения в табличной форме.

Флуктуации межзвездной пылевой среды типичны на пространственном масштабе порядка парсека. Они приводят к тому, что индивидуальные покраснения/поглощения для соседних звезд могут существенно различаться (см. обсуждение Гринном и др. (2015), Гринном и др. (2019, далее — GSZ19)², Гончаровым (2019)). Так как трехмерные карты используют индивидуальные покраснения/поглощения в некотором пространственном окне для оценки покраснения/поглощения в точке, карты сглаживают флуктуации среды в большей или меньшей степени в зависимости от размера окна. Размером этого окна определяется пространственное разрешение карты. Оно весьма различно для разных карт: например, в ближайшем к Солнцу килопарсеке карта GSZ19 имеет пространственное разрешение около 1 пк, в то время как карты Гончарова (2017, далее — G17)³ и Лаллемент и др. (2019, далее — LBV19)⁴ — около 25 пк. В результате оценки покраснения из GSZ19 отражают флуктуации среды, а оценки из G17 и LBV19 сильно сглаживают их.

Карты покраснения/поглощения с их табличным представлением данных не позволяют вскрыть закономерности крупномасштабного распределения пыли в пространстве, объяснить физику и геометрию распределения пыли. Для этого с середины XX в. предпринимались попытки представить пространственные вариации покраснения/поглощения (или связанного с ними пространственного распределения пыли) в виде аналитических функций галактических координат, т.е. в виде трехмерной аналитической модели покраснения/поглощения (или распределения пыли). В частности, именно модели могут дать наиболее соответствующие наблюдениям геометрические характеристики галактического слоя пыли в окрестностях Солнца: толщину слоя, пространственную плотность распределения пыли в нем, сдвиг и наклон слоя относительно основной плоскости Галактики. Эти характеристики важны для понимания структуры и эволюции нашей и других галактик, как входные данные

при построении моделей Галактики, а также для оценки характеристик внегалактических объектов в высоких широтах, которые наблюдаются сквозь галактический слой пыли. Например, модель пространственного распределения пыли Дриммеля и др. (2003) использована в Безансонской модели Галактики (Чекай и др., 2014). Кроме того, модели покраснения/поглощения дают начальные оценки при дальнейшем уточнении итерациями как индивидуальных покраснений/поглощений (как в AKQ22), так и трехмерных карт (как в GSZ19).

Простейшая модель с экспоненциальным вертикальным распределением пыли в одном слое вдоль основной плоскости Галактики, без долготных вариаций в распределении пыли, была предложена в середине 20 века Паренаго (1954) и другими авторами. В этой модели кумулятивное поглощение A от наблюдателя до точки пространства описывается барометрическим законом:

$$A = E R (1 - e^{-|Z - E_Z|/E_{\text{scale}}}) E_{\text{scale}} / |Z - E_Z|, \quad (1)$$

где E — дифференциальное поглощение в основной плоскости пылевого слоя, R — расстояние от Солнца до точки пространства, Z — расстояние от точки до основной плоскости Галактики вдоль галактической оси Z^5 , E_Z — сдвиг основной плоскости пылевого слоя относительно основной плоскости Галактики вдоль оси Z и E_{scale} — шкала высот слоя пыли.

Альтернативная трехмерная аналитическая модель была предложена Арену и др. (1992). Она аппроксимирует поглощение в 199 небесных площадках параболами в зависимости от расстояния до Солнца. Эта модель основывалась на оценках поглощения для небольшого числа звезд. Но главным ее недостатком являлось формальное описание вариаций поглощения без какого-то физического объяснения.

Еще одна трехмерная модель пространственного распределения пыли Дриммеля, Шпергеля (2001) была сопоставлена с наблюдательными данными и обоснована Дриммелем и др. (2003). Эта модель включает три структурных пылевых компонента: искривленный, но в остальном осесимметричный диск, спиральные ветви с распределением пыли в соответствии с известными районами ионизованного водорода H II и местный сегмент спирального рукава Ориона. Хотя эта модель распространяется на значительную часть Галактики, но вблизи Солнца она дает недостаточно детальное описание распределения пыли,

² <http://argonaut.skymaps.info/>

³ <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/PAZh/43/521>

⁴ https://astro.acri-st.fr/gaia_dev/

⁵ Рассматривается галактическая прямоугольная система 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.

как отмечено самими авторами модели и показано Гончаровым, Мосенковым (2017, 2018, 2021б).

Модели Аморес, Лепине (2005) основаны на гипотезе, что поглощение пропорционально кумулятивной плотности распределения газа, которая, в свою очередь, взята из обзоров Н I, CO и пылевой эмиссии. Первая версия их модели предполагала осесимметричную Галактику с вариациями пространственной плотности распределения пыли в зависимости от расстояния до центра Галактики и координаты Z . Вторая версия учла спиральную структуру Галактики. Позже их модель для осесимметричной Галактики была откалибрована по данным для выборки эллиптических галактик (Аморес, Лепине, 2007). Этой модели присущ тот же недостаток, что и модели Дриммеля и др. (2003): охват большой части Галактики за счет недостаточно подробного описания окрестностей Солнца.

Будучи более реалистичными, чем простейшая модель (1), более поздние модели так или иначе пытались учесть хорошо известное распределение основных пылевых облаков на небе не только вдоль галактического экватора, но и вдоль пояса Гулда. Это распределение представлено, например, Дэймом и др. (2001) на их рис. 2а. При этом Дэйм и др. (2001) отметили, что большинство основных местных молекулярных облаков, как оказалось, следуют поясу Гулда, наблюдаемому диску звезд ОВ, газа и пыли, окружающему Солнце и наклоненному примерно на 20° к галактической плоскости.

Гончаров (2009, далее — G09) предложил первую трехмерную аналитическую модель распределения пыли с пылевым слоем в поясе Гулда в дополнение к обычному слою вдоль основной плоскости Галактики. Параметры этой модели получены с использованием нескольких наборов данных с оценками расстояний и поглощений, которые сегодня должны считаться неточными. Вторая версия этой модели представлена Гончаровым (2012б). Ее параметры получены на основе трехмерной карты покраснений Гончарова (2010), комбинированной с трехмерной картой пространственных вариаций коэффициента поглощения $R_V \equiv A_V/E(B-V)$ Гончарова (2012а). Гончаров (2019) представил третью версию той же модели с более реалистичной геометрией пылевых слоев. Ее параметры определены с использованием наблюдаемых характеристик полной выборки красных гигантов сгущения из Gaia Data Release 2 (Гая, 2018) в широких галактических окрестностях Солнца. Однако наш детальный анализ этой выборки показал, что распределение пыли во втором и четвертом галактических квадрантах не описывается в полной мере двумя рассматриваемыми слоями пыли. В четвертой версии нашей модели Гончаровым, Мосенковым (2021б) эти скопления пыли во втором и четвертом квадрантах

описаны как часть экваториального слоя. В пятой версии нашей модели, представленной в настоящей статье, эти же скопления рассматриваются как проявления отдельного пылевого слоя, который наклонен и сдвинут относительно экваториального слоя и слоя в поясе Гулда.

Детальное сравнение некоторых карт и моделей покраснения/поглощения друг с другом и с различными наборами данных представлено в наших прежних исследованиях (Гончаров, 2017; Гончаров, Мосенков, 2017а,б, 2018, 2019, 2021а,б). Это сравнение выявило непреодолимые ограничения некоторых моделей и соответствующие трудности в создании модели, опирающейся на сегодняшние данные и одинаково точно предсказывающей поглощение как вблизи Солнца, так и в значительной части Галактики. Фактически сегодня точная модель трехмерного распределения пыли может быть создана в области Галактики, где Gaia дает точные параллаксы и фотометрию для полных выборок звезд определенных классов. Поэтому в настоящей статье вместо рассмотрения множества моделей в большой части Галактики мы приложили усилия к улучшению нашей модели с использованием данных для ближайшего к Солнцу килопарсека. Это оправдано еще и следующей причиной. Игнорируя флуктуации среды, модель дает наиболее точные предсказания в высоких широтах, где флуктуации минимальны. Поэтому модель наиболее полезна для предсказания и анализа поглощений внегалактических объектов в высоких широтах. Учитывая, что в высоких широтах почти вся пыль между нами и внегалактическими объектами содержится в пределах ближайшего килопарсека, не имеет смысла строить модель за его пределами, по крайней мере, на основе современных данных.

Важно, что в высоких широтах наша модель полезна далеко за пределами ближайшего килопарсека. Действительно, оценки толщины галактического слоя пыли (например, Гончаровым, Мосенковым, 2021б) показывают существенные вариации пространственной плотности распределения пыли не далее $|Z| \approx 450$ пк. Рассматриваемый пространственный цилиндр проходит сквозь весь слой пыли такой толщины на широтах $|b| > \arctg(450/1000) \approx 24^\circ$, т.е. для большей части неба. В этой части наша модель способна предсказать поглощение для многочисленных внегалактических объектов.

Настоящая статья организована следующим образом. В разделе ‘Модель’ мы описываем нашу модель. Используемые данные описаны в разделе ‘Данные’. Наиболее вероятные параметры нашей модели представлены в разделе ‘Результаты’. Замечания к результатам мы даем в разделе ‘Обсуждение’. В разделе ‘Применение к скоплениям и переменным звездам’ мы тестируем модель и делаем выводы в разделе ‘Заключение’.

МОДЕЛЬ

Как и предыдущая версия нашей модели (Гончаров, Мосенков, 2021б), текущая версия представляет поглощение до звезды или точки пространства как сумму поглощений в трех пылевых слоях. Каждое слагаемое — функция галактических координат. Два слагаемых одинаковы в обеих версиях (но различаются значениями параметров): они описывают поглощение функцией, включающей синусоидальную зависимость от галактической долготы в экваториальном слое и удвоенной долготы (в системе координат пояса Гулда) в слое пояса. Эти долготные вариации в экваториальном слое обоснованы известным ростом поглощения в направлении центра Галактики, а в поясе Гулда — известными концентрациями пыли на двух противоположных сторонах пояса, в комплексах облаков Aquila (Aquila Rift), Ophiuchus и Lupus примерно в направлении центра Галактики и Taurus, Perseus, Auriga и Orion примерно в направлении антицентра. Третье слагаемое в обеих версиях введено для представления концентраций пыли во втором и четвертом галактических квадрантах, в созвездиях Цефея ($l \approx 120^\circ$) и Хамелеона ($l \approx 300^\circ$) соответственно. Следовательно, это слагаемое описывает поглощение функцией, включающей синусоидальную зависимость от удвоенной долготы, в экваториальном слое (в прежней версии) и в отдельном третьем слое (в новой версии модели). Далее параметры модели, относящиеся к слоям вдоль экватора, в поясе Гулда и в слое Цефея–Хамелеона, обозначены буквами ‘E’, ‘B’ и ‘C’ соответственно.

Основные плоскости слоев пояса Гулда и Цефея–Хамелеона наклонены к основной плоскости Галактики на углы B_{tilt} и C_{tilt} соответственно. Их приближенные оценки: $B_{\text{tilt}} \approx 17^\circ$ на основе известной ориентации пояса Гулда (Перриман, 2009, с. 311–314, 324–328; Бобылев, 2014) и $C_{\text{tilt}} \approx -25^\circ$ с учетом широт комплексов облаков в Цефее (Cepheus Flare) и Хамелеоне (Chamaeleon Complex). Положительный и отрицательный знаки этих оценок значат такую ориентацию слоев, при которой к центру Галактики направлены стороны этих слоев с положительной или отрицательной галактической широтой соответственно.

В нашей модели экваториальный слой рассматривается как бесконечный вдоль осей X и Y , так как он распространяется далеко за пределы ближайшего килопарсека. Основная плоскость экваториального слоя сдвинута относительно Солнца вдоль оси Z на расстояние E_Z .

Основные плоскости других слоев рассматриваются как эллипсы с центрами, смещенными относительно Солнца вдоль осей X , Y и Z на расстояния B_X , B_Y , B_Z и C_X , C_Y , C_Z для пояса Гулда и слоя Цефея–Хамелеона соответственно. Эти

эллипсы имеют большие полуоси B_{major} и C_{major} , малые полуоси B_{minor} и C_{minor} и эксцентриситеты B_e и C_e . $B_{\text{s.m.a.}}$ и $C_{\text{s.m.a.}}$ — долготы больших полуосей в системах координат слоев. B_{cross} и C_{cross} — галактические долготы линий пересечения основных плоскостей слоев с основной плоскостью Галактики.

Координаты звезды или точки пространства в системах координат пояса Гулда и слоя Цефея–Хамелеона — это широты B_β и C_β , долготы B_λ и C_λ и расстояния B_ζ и C_ζ от основных плоскостей соответственно. B_{Rmax} и C_{Rmax} — расстояния от Солнца до краев слоев вдоль луча зрения, направленного на рассматриваемую звезду/точку. Мы вычисляем поглощение в каждом конечном слое только либо до его края, либо до звезды/точки в зависимости от того, что находится ближе к нам. Геометрия, наклон и поворот слоя в поясе Гулда определяются соотношениями

$$B_e^2 = 1 - B_{\text{minor}}^2/B_{\text{major}}^2, \quad (2)$$

$$B_{\text{Rmax}}^2 = B_{\text{minor}}^2/(1 - [B_e \cos(B_\lambda - B_{\text{s.m.a.}})]^2), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sin(B_\beta) &= \cos(B_{\text{tilt}}) \sin(b) - \\ &- \sin(B_{\text{tilt}}) \cos(b) \sin(l - B_{\text{cross}}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tan(B_\lambda) &= [\sin(B_{\text{tilt}}) \sin(b) + \cos(B_{\text{tilt}}) \times \\ &\times \cos(b) \sin(l - B_{\text{cross}})] / \cos(b) \cos(l - B_{\text{cross}}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$B_\zeta = \min(R, B_{\text{Rmax}}) \sin(B_\beta). \quad (6)$$

Соотношения для слоя Цефея–Хамелеона аналогичны.

Как отмечено ранее, поглощение A , предсказываемое нашей моделью для звезды/точки, является суммой трех слагаемых $A = A_E + A_B + A_C$. Каждое слагаемое аналогично уравнению (1) и зависит от долготы вдоль основной плоскости соответствующего слоя:

$$\begin{aligned} A_E &= [E + E_{\text{amplitude}} \sin(l + E_{\text{phase}})] \times \\ &\times R(1 - e^{-|Z - E_Z|/E_{\text{scale}}}) E_{\text{scale}}/|Z - E_Z|, \end{aligned} \quad (7)$$

где E , $E_{\text{amplitude}}$, E_{phase} и E_{scale} — постоянный член, амплитуда, фаза и шкала высот для экваториального слоя. Параметры для других слоев аналогичны за исключением коэффициента 2 перед B_λ и C_λ , а также множителя $\min(R, B_{\text{Rmax}})$ или $\min(R, C_{\text{Rmax}})$ вместо R :

$$\begin{aligned} A_B &= [B + B_{\text{amplitude}} \sin(2B_\lambda + B_{\text{phase}})] \times \\ &\times \min(R, B_{\text{Rmax}}) \times \\ &\times (1 - e^{-|B_\zeta - B_Z|/B_{\text{scale}}}) B_{\text{scale}}/|B_\zeta - B_Z|, \end{aligned} \quad (8)$$

$$A_C = [C + C_{\text{amplitude}} \sin(2C_\lambda + C_{\text{phase}})] \times \quad (9)$$

$$\times \min(R, C_{R\text{max}}) \times$$

$$\times (1 - e^{-|C_\zeta - C_Z|/C_{\text{scale}}}) C_{\text{scale}} / |C_\zeta - C_Z|.$$

ДААННЫЕ

Наша модель рассматривает каждую точку межзвездной среды как взаимное наложение трех рассматриваемых слоев, имеющих довольно большие размеры. Следовательно, поиск наилучших параметров модели с использованием набора данных невырожден только при использовании очень точных расстояний и поглощений. Более того, звезды или точки набора данных должны достаточно равномерно заполнять рассматриваемое пространство. При этом особенно важны точность и представительность данных вдали от основной плоскости Галактики, где слои наиболее удалены друг от друга. Очень немногие наборы данных с оценками покраснения/поглощения удовлетворяют этим требованиям.

Карта покраснения G17 покрывает пространство в пределах $R < 1200$ и $|Z| < 600$ пк. Эта карта получена на основе подсчетов миллионов звезд поворота главной последовательности на диаграммах цвет—величина по фотометрии Two Micron All-Sky Survey (2MASS; Скрутские и др., 2006). Это первая трехмерная карта, полученная на основе расстояний, откалиброванных по параллаксам Gaia.

Карта поглощения LBV19 покрывает пространство в пределах $R < 3000$ и $|Z| < 400$ пк. LBV19 использует параллаксы Gaia в комбинации с фотометрией из Gaia и 2MASS для того, чтобы получить расстояния и поглощения с помощью моделирования пространственного распределения пыли как Гауссова процесса. С удалением от Солнца падают пространственная плотность распределения используемых звезд, точность их параллаксов и фотометрии. Соответственно падают пространственное разрешение и точность карты LBV19: только в ближайшем килопарсеке они остаются приемлемыми для нашего исследования. Более того, возможно, ограничение карты LBV19 $|Z| < 400$ пк делает неточными и смещает оценки искомым параметров слоев в поясе Гулда и Цефее—Хамелеоне из-за того, что LBV19 бедна данными для частей этих слоев, наиболее далеких от основной плоскости Галактики.

Карта GSZ19 получена путем применения вероятностных моделей к параллаксам Gaia и фотометрии Pan-STARRS DR1 (Чамберс и др., 2016, далее PS1) и 2MASS. GSZ19 распространяется на несколько килопарсек от Солнца, но из-за использования Pan-STARRS DR1 покрывает только 3/4 неба ($\delta > -30^\circ$). Однако из-за того,

что близкие к Солнцу звезды Pan-STARRS DR1 слишком яркие и фотометрически передержаны, авторы GSZ19 не смогли получить оценки покраснения вблизи Солнца, ближе некоторого расстояния, которое индивидуально для каждого луча зрения. Обычно такое расстояние составляет 250–300 пк. Отсутствие оценок GSZ19 для четверти неба и в радиусе несколько сотен парсек от Солнца должно существенно смещать оценки искомым параметров нашей модели. Чтобы подавить такие смещения, мы ограничили пространство, где рассматриваются оценки GSZ19, по расстоянию $(X^2 + Y^2)^{0.5}$.

Таким образом, упомянутые особенности заставили нас одинаково для всех карт ограничить рассматриваемое пространство цилиндром в пределах $(X^2 + Y^2)^{0.5} < 1000$ и $|Z| < 1000$ пк. Этот цилиндр слегка выходит за пределы ближайшего килопарсека.

Исходные оценки покраснения/поглощения из G17, LBV19 и GSZ19 пересчитаны в оценки поглощения A_V в полосе V с использованием закона поглощения Карделли и др. (1989, далее — CCM89) с $R_V = 3.1$.

Карты G17, LBV19 и GSZ19 позволяют интерполировать поглощение для бесконечного множества лучей зрения. Поэтому для каждой карты мы выбрали случайно 256 000 точек, равномерно распределенных в рассматриваемом пространстве, поглощение в которых использовалось для определения параметров модели.

Кроме трех карт покраснения/поглощения нами использован набор данных AKQ22 с индивидуальными оценками A_V для множества звезд. Видимо, эти оценки являются наиболее точными массовыми оценками поглощения на основе результатов Gaia EDR3. Поэтому в нашем исследовании AKQ22 особенно важен как прототип будущих результатов Gaia. Декларированная точность оценок A_V из AKQ22 составляет 0.13^m и 0.15^m для звезд со звездной величиной в широком фильтре Gaia $G = 14^m$ и 17^m соответственно.

AKQ22 не имеет ограничений, отмеченных нами для трех карт. Это позволило рассмотреть и пространство с $(X^2 + Y^2)^{0.5} > 1000$ пк. Оказалось, что наша модель примерно одинаково успешна в предсказании поглощения вплоть до $(X^2 + Y^2)^{0.5} = 1200$ пк, т.е. она дает примерно постоянное среднее стандартное отклонение вида ‘AKQ22 минус наилучшее модельное предсказание’ и примерно постоянный коэффициент корреляции. Вблизи основной плоскости Галактики при $(X^2 + Y^2)^{0.5} > 1200$ пк соответствие модели оценкам AKQ22 ухудшается из-за далеких ‘контейнеров’ пыли вне рассматриваемой нами геометрии трех слоев (см. раздел Обсуждение).

Для определения параметров нашей модели мы использовали различные выборки звезд из АКQ22. Использование только гигантов дало более надежные результаты (наименее зависящие от состава и пространственного распределения выборки), чем использование только звезд главной последовательности или всех классов.

Финальная выборка лучших данных из АКQ22 включает 993 291 звезду в пределах $(X^2 + Y^2)^{0.5} < 1200$ и $|Z| < 1000$ пк, с относительной точностью расстояний лучше 10%, неопределенностью A_V лучше 0.2^m , абсолютной величиной $0 < M_G < 3.3$ (этот критерий отбирает гиганты), цветом в диапазоне $0.85 < (BP - RP)_0 < 1.71$ с использованием фильтров Gaia BP и RP (этот критерий уточняет отбор гигантов), $\text{fidelity} > 0.5$, $\text{output flag} = \%00$, и ограничением по $\text{phot_bp_rp_colour_excess}$ в соответствии с уравнением (18) из статьи Гая (2021б). Параметры нашей модели из ее сопоставления с полной выборкой 993 291 гиганта АКQ22 и со случайно отобранными подвыборками 256 000 гигантов оказались примерно одинаковыми.

Отметим, что 24 904 (2.5%) среди отобранных 993 291 гиганта АКQ22 имеют отрицательные оценки поглощения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Новая версия нашей модели имеет 29 искомым параметров: 5, 12 и 12 для слоя вдоль основной плоскости Галактики, в поясе Гулда и в слое Цефея–Хамелеона соответственно. При вычислении наиболее вероятных значений параметров каждый параметр варьировался с достаточно подробным шагом в достаточно широких пределах. Например, все угловые параметры варьировались нами во всем интервале углов $0^\circ - 360^\circ$ с шагом 0.5 градуса. Современные вычислительные ресурсы позволили нам рассмотреть несколько триллионов наборов параметров в их 29-мерном пространстве. Для каждого набора параметров мы вычислили невязки вида ‘набор данных минус модель’, их среднее и стандартное отклонения, а также линейный коэффициент корреляции между модельными предсказаниями и оценками из набора данных. Набор значений параметров, который дает нулевую среднюю невязку, минимальное стандартное отклонение и максимальный коэффициент корреляции, является наиболее вероятным (т.е. искомым решением).

В табл. 1 представлены найденные нами наиболее вероятные значения параметров для каждого набора данных. Отметим, что в табл. 1 для удобства даны оценки малых и больших полуосей и эксцентриситетов, хотя только два из этих трех

параметров являются независимыми. В табл. 1 даны не только сдвиги слоев относительно Солнца вдоль осей координат, но и полные сдвиги $(B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2)^{0.5}$ и $(C_X^2 + C_Y^2 + C_Z^2)^{0.5}$ для слоя пояса Гулда и Цефея–Хамелеона соответственно.

Найденные значения параметров в табл. 1 согласуются с ограничениями, которые можно наложить на параметры, исходя из известного расположения крупнейших пылевых облаков и других оценок параметров из литературы: Дэйм и др. (2001), Кун и др. (2008), Перриман (2009), Гончаров (2012в), Чен и др. (2020), Спилкер и др. (2021) и ссылки в них. А именно, стоит ожидать:

- $10 < E_Z < 30$ пк;
- $35 < E_{\text{scale}} < 200$ пк;
- $20^\circ < E_{\text{phase}} < 60^\circ$, подразумевая тенденцию роста поглощения от третьего к первому галактическому квадранту;
- $B_{\text{tilt}} \approx 18^\circ$;
- $B_{\text{cross}} \approx -90^\circ$, подразумевая, что пояс Гулда поднимается выше и опускается ниже галактического экватора примерно в направлениях центра и антицентра Галактики соответственно;
- $B_{\text{s.m.a.}} \approx +90^\circ$, подразумевая, что большая полуось пояса Гулда направлена примерно вдоль оси X ;
- $B_{\text{phase}} \approx -90^\circ$, подразумевая максимальное поглощение в слое пояса Гулда вдоль его большой полуоси;
- $B_{\text{major}} < 1000$ пк в качестве оценки размера пояса Гулда;
- $C_{\text{major}} \geq 1000$ пк в качестве оценки расстояния до большинства пылевых облаков в Цефее (пылевого комплекса Cepheus Flare);
- сдвиг центра пояса Гулда $50 < (B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2)^{0.5} < 150$ пк.

Низкие стандартные отклонения и высокие коэффициенты корреляции в табл. 1 означают, что наша модель является хорошей аппроксимацией рассматриваемых наборов данных. Таблица 1 показывает, что наборы данных дают схожие значения параметров. Это позволяет нам рассмотреть значения параметров, осредненные для четырех наборов данных, и их стандартные отклонения, которые представлены в правом столбце табл. 1 (как отмечено ранее, оценки некоторых параметров

Таблица 1. Параметры нашей модели, полученные для рассматриваемых наборов данных

Параметр	G17	LBV19	GSZ19	AKQ22	Среднее
Экваториальный слой					
E_Z (пк)	15	29	20	30	24 ± 7
E (величина кпк ⁻¹)	0.88	0.58	1.05	0.88	0.85 ± 0.20
$E_{\text{amplitude}}$ (величина кпк ⁻¹)	0.54	0.58	1.05	0.55	0.68 ± 0.25
E_{phase} (градусы)	42	23	41	28	33 ± 10
E_{scale} (пк)	65	40	38	58	50 ± 13
Слой пояса Гулда					
B_X (пк)	9	0	(32)	5	5 ± 5
B_Y (пк)	68	90	(30)	68	75 ± 13
B_Z (пк)	6	-25	(14)	9	-3 ± 19
B_{tilt} (градусы)	17	10	15	16	15 ± 3
B_{cross} (градусы)	-89	-92	-94	-90	-91 ± 2
$B_{\text{s.m.a.}}$ (градусы)	92	102	100	95	97 ± 5
B (величина кпк ⁻¹)	1.18	0.95	1.03	1.02	1.05 ± 0.10
$B_{\text{amplitude}}$ (величина кпк ⁻¹)	1.18	0.94	1.03	1.02	1.04 ± 0.10
B_{phase} (градусы)	-84	-99	-104	-90	-94 ± 9
B_{scale} (пк)	67	58	50	62	59 ± 7
B_{minor} (пк)	136	154	220	155	166 ± 37
B_{major} (пк)	690	730	830	720	743 ± 61
B_{ϵ}	0.979	0.977	0.964	0.977	0.975 ± 0.007
Сдвиг центра пояса Гулда (пк)	69	93	(46)	69	76 ± 24
Слой Цефея–Хамелеона					
C_X (пк)	-75	-80	(-40)	-74	-76 ± 3
C_Y (пк)	5	-10	(0)	0	-2 ± 8
C_Z (пк)	-5	0	(48)	0	-2 ± 3
C_{tilt} (градусы)	-42	-18	(-4)	-23	-28 ± 13
C_{cross} (градусы)	-80	-86	(-87)	-91	-86 ± 6
$C_{\text{s.m.a.}}$ (градусы)	30	29	(29)	23	27 ± 4
C (величина кпк ⁻¹)	0.85	0.47	(0.65)	0.38	0.57 ± 0.25
$C_{\text{amplitude}}$ (величина кпк ⁻¹)	0.24	0.47	(0.65)	0.38	0.36 ± 0.12
C_{phase} (градусы)	132	62	(25)	47	80 ± 45
C_{scale} (пк)	155	60	(48)	90	102 ± 49

Таблица 1. Окончание

Параметр	G17	LBV19	GSZ19	AKQ22	Среднее
C_{minor} (пк)	230	180	(266)	250	220 ± 36
C_{major} (пк)	1000	1000	(1000)	1200	>1000
C_e	<i>0.973</i>	<i>0.984</i>	<i>(0.964)</i>	<i>0.978</i>	<i>0.978 \pm 0.005</i>
Сдвиг центра слоя Цефея (пк)	<i>75</i>	<i>81</i>	<i>(62)</i>	<i>74</i>	<i>76 \pm 9</i>
Стандартное отклонение невязок A_V	0.17	0.24	0.33	0.35	
Коэффициент корреляции	0.86	0.83	0.77	0.73	

Примечание. Значения параметров, не использованные при вычислении средних значений, даны в скобках. Значения параметров, зависящих от других параметров, выделены курсивом.

могут быть сильно смещены — в табл. 1 они взяты в скобки и не использованы при осреднении). Эти стандартные отклонения представляются нам более содержательной оценкой точности полученных параметров, чем иные оценки.

Характеристики в табл. 1 можно разделить на характеристики пространственной плотности распределения пыли E , $E_{\text{amplitude}}$, E_{phase} , E_{scale} , B , $B_{\text{amplitude}}$, B_{phase} , B_{scale} , C , $C_{\text{amplitude}}$, C_{phase} , C_{scale} и остальные, геометрические характеристики слоев, описывающие их размер, форму, ориентацию и смещение относительно Солнца. Первые заметно различаются для разных наборов данных, а вторые довольно близки (пожалуй, за исключением наклона C_{tilt} слоя Цефея—Хамелеона, который, надеемся, будет определен точнее при появлении более точных наборов данных). Различия в характеристиках пространственной плотности распределения пыли вызвано ошибками данных, различием в пространственном и угловом разрешении наборов данных, разницей в методах создания наборов данных и возможными пространственными вариациями закона поглощения. Эти вариации могут быть важны, так как мы пересчитываем в A_V , используя закон поглощения SSM89 с $R_V = 3.1$, исходные оценки наборов данных, полученные в разных диапазонах длин волн. А именно, мы используем покраснение $2\text{MASS } E(J - K_s)$ из G17, покраснение $E(gp_{S1} - r_{p_{S1}})$ из GSZ19, поглощение A_0 на длине волны 550 нм из LBV19 и поглощение A_V из AKQ22, фактически вычисленное авторами по A_G . В будущем при появлении более обширных и точных наборов данных и/или при выявлении существенных систематических ошибок в каком-либо наборе данных наша модель может учесть пространственные вариации закона поглощения и/или масштабироваться с учетом найденной ошибки. При этом геометрические характеристики слоев, если и изменятся, то незначительно, а существенно будут

уточняться и, надеемся, сойдутся к неким единым значениям лишь характеристики пространственной плотности распределения пыли.

На рис. 1 показано поглощение, осредненное в ячейках размером 2×2 квадратных градуса, в зависимости от галактических координат: оценки A_V из наборов данных и предсказания нашей модели представлены в левом и правом столбиках соответственно. Так как это сравнение не учитывает изменение поглощения с расстоянием, оно является неполным, ‘двумерным’ (прямое сопоставление наблюдаемых и предсказанных поглощений дано далее). Из-за примерно равномерного распределения используемых звезд/точек в пространстве и роста поглощения с расстоянием рис. 1 фактически показывает поглощение на значительном удалении, на расстоянии в несколько сотен парсек от Солнца. Однако этого достаточно для того, чтобы убедиться, что все наборы данных показывают качественно схожие вариации поглощения по небу, которые успешно описываются нашей моделью, хотя и сильно сглаживаются. Заметно лишь разногласие между наборами данных в оценках поглощения в высоких широтах, где преобладают звезды/точки с $R > 500$ пк, т.е. за пределами галактического слоя пыли: от примерно нулевого поглощения по данным LBV19 до максимального, существенно ненулевого, по данным G17. Эти разногласия между наборами данных могут быть объяснены и будут разрешены в будущих исследованиях (см. детальное обсуждение Гончаровым, Мосенковым, 2018, 2021а,б). Прямое сравнение наборов данных между собой выходит за рамки настоящего исследования, за исключением сравнения GSZ19 и AKQ22 в разделе Обсуждение.

Рисунок 1 можно сравнить с рис. 7 из статьи Гончарова, Мосенкова (2021б). В частности, предсказания новой версии нашей модели (правый столбик рис. 1) можно сравнить с предсказаниями

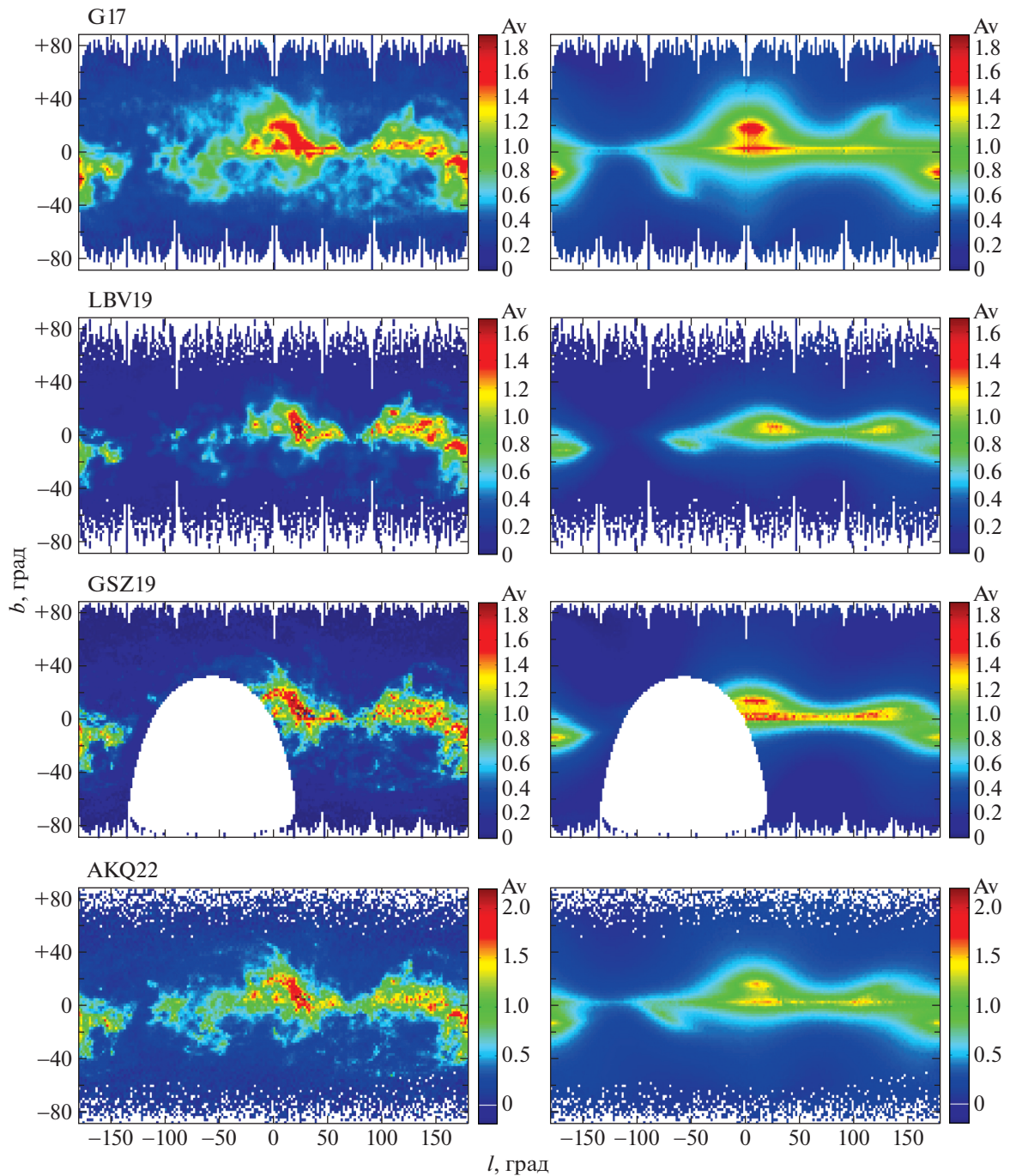


Рис. 1. Поглощение A_V , осредненное в ячейках размером 2×2 квадратных градуса, в зависимости от галактических координат: из различных наборов данных (левый столбик графиков) и наилучшие предсказания модели (правый столбик графиков). A_V представлено цветовой шкалой справа.

предыдущей версии нашей модели (вторая строка графиков на рис. 7 из статьи Гончарова, Мосенкова, 2021б). Это сравнение показывает, что новая версия воспроизводит наблюдаемые вариации поглощения гораздо точнее. Особенно успешно ею воспроизведены облака Polaris Flare около $l \approx 125^\circ$, $b \approx +25^\circ$ и южная часть комплекса обла-

ков в созвездии Хамелеона (Chamaeleon Complex) около $l \approx -60^\circ$, $b \approx -25^\circ$, которые отчетливо выделяются всеми наборами данных. Уже этого достаточно для того, чтобы оправдать введение слоя Цефея–Хамелеона в нашу модель.

Рисунок 2 показывает вклад каждого слоя в суммарные оценки поглощения по нашей модели в

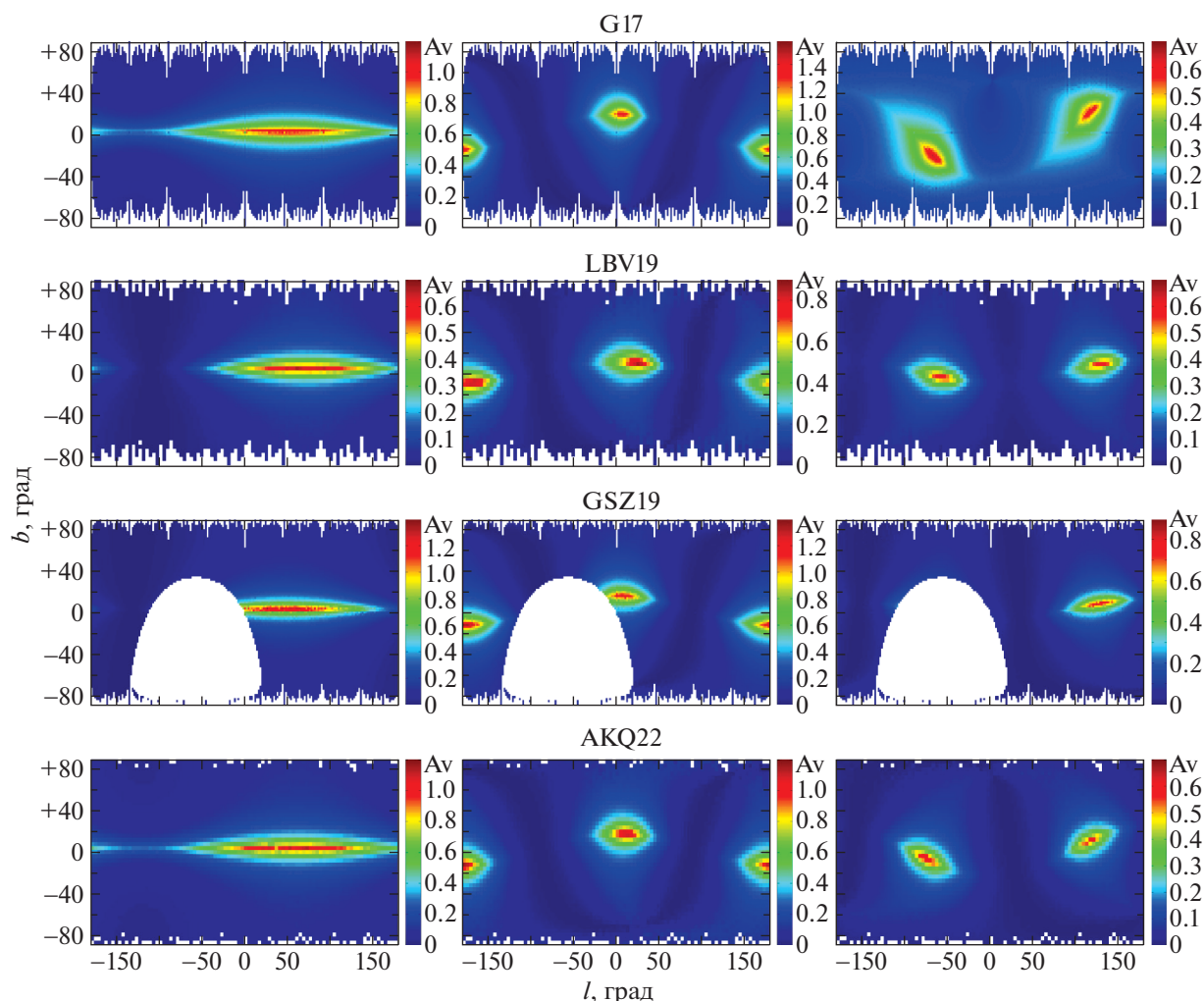


Рис. 2. Поглощение A_V , осредненное в ячейках размером 2×2 квадратных градуса, в зависимости от галактических координат, предсказанное моделью для экваториального слоя (левый столбик графиков), слоя в поясе Гулда (средний столбик графиков) и слоя Цефея–Хамелеона (правый столбик графиков) для разных наборов данных. A_V представлено цветовой шкалой справа.

зависимости от галактических координат. Другими словами, правый столбик рис. 1 является суммой трех столбиков рис. 2. Видно, что модель показывает схожую геометрию слоев при использовании разных наборов данных, несмотря на некоторые различия в решениях для разных наборов данных в табл. 1. Наиболее важный вывод из рис. 2 состоит в том, что разные наборы данных предполагают очень схожие координаты для областей со сравнительно высоким поглощением в средних и высоких широтах, которые видны в среднем и правом столбиках графиков на рис. 2.

Отметим, что очень большие значения эксцентриситета пылевых слоев в поясе Гулда и в Цефее–Хамелеоне, полученные нами по всем наборам данных, предполагают, что значительная часть пыли содержится в немногочисленных комплексах облаков Aquila (Aquila Rift), Ophiuchus, Orion, Taurus,

Perseus, Cepheus и Chamaeleon. Однако рис. 2 показывает, что остальная не менее значительная часть пыли распределена в обширном пространстве. Таким образом, рассматриваемые слои формируют протяженные ‘контейнеры’ диффузной пыли. А известные пылевые облака являются лишь вершиной айсберга для этих ‘контейнеров’. Тогда для любой трехмерной аналитической модели поглощения или пространственного распределения пыли точное предсказание поглощения в каждой точке пространства гораздо важнее, чем описание известных пылевых облаков. Подчеркнем, что малая и большая полуоси основных плоскостей слоев, а также шкалы высот слоев не указывают на размер этих ‘контейнеров’ пыли, а лишь являются параметрами в формальном описании пылевой среды. Например, в любой модели с экспоненциальным вертикальным распределением пыли

ее концентрация велика даже вдали от основной плоскости: заметная доля, 5% пыли, находится дальше утроенного значения шкалы высот, т.е. в терминах формулы (1) при $|Z| > 3 E_{\text{scale}}$.

В средних и высоких широтах рассеянная в пространстве диффузная пыль, не входящая в крупные облака, описывается нашей моделью как принадлежащая, в значительной степени, слоям пояса Гулда и Цефея—Хамелеона. Следовательно, эти слои важны и как математические описания, и как реальные ‘контейнеры’ пыли при анализе поглощения до внегалактических объектов в средних и высоких широтах. Например, наше усредненное решение из табл. 1 отводит экваториальному слою, слою пояса Гулда и слою Цефея—Хамелеона вклады 36, 57 и 7% соответственно в общее поглощение в направлении галактических полюсов.

Пространственная плотность пыли и соответствующее поглощение в слое Цефея—Хамелеона, вероятно, меньше, чем в остальных слоях. Это видно как на рис. 2, так и из сравнения постоянных членов в табл. 1. Это может быть причиной большой неопределенности и разногласий в оценках наклона слоя к экватору C_{tilt} на основе разных наборов данных. Эти неопределенности и разногласия видны в табл. 1 и на рис. 2. Однако довольно большие значения наклона C_{tilt} кажутся резонными, так как только такие большие значения могут объяснить существование некоторых облаков в диапазоне $20^\circ < |b| < 40^\circ$, которые видны на рис. 1.

Как отмечено ранее, GSZ19 смещает оценки некоторых параметров из-за отсутствия данных в четвертом и части третьего галактических квадрантов (рис. 1 и 2). В частности, GSZ19 ‘не видит’ комплекс облаков в Хамелеоне (Chamaeleon Complex), и, как следствие, оценки параметров слоя Цефея—Хамелеона смещены. Кроме того, эта асимметрия в пространственном распределении данных GSZ19 смещает оценку положения пояса Гулда относительно Солнца.

Таблица 1 дает положения центров слоев пояса Гулда и Цефея—Хамелеона относительно Солнца. Для слоя Цефея—Хамелеона это положение найдено впервые. Центр слоя Цефея—Хамелеона сдвинут в направлении антицентра Галактики. Центр слоя в поясе Гулда ($X = +5 \pm 5$, $Y = +75 \pm 13$, $Z = -3 \pm 19$, $R = 76 \pm 24$ пк) оказался несколько ближе к Солнцу, чем следует из оценок Перримана (2009) и Бобылева (2014) по пространственному распределению молодых звезд (во втором квадранте, $R \approx 150$ пк), а также ближе, чем по предыдущей версии нашей модели (Гончаров, Мосенков, 2021б): $X = -15 \pm 15$, $Y = +125 \pm 15$, $Z = -28 \pm 15$, $R = 129 \pm 26$ пк. Однако пространственное распределение пыли может отличаться от распределения

молодых звезд. И все же основная причина этого расхождения — введение в новую версию модели слоя Цефея—Хамелеона. Действительно, предыдущая версия, как и большинство прежних исследований, рассматривали все средне- и высокоширотные облака как части пояса Гулда. Например, Кирк и др. (2009) рассматривали облака Serpens Flare как часть пояса Гулда, что совершенно не подтверждается их положением.

Для лучшего понимания геометрии слоев мы воспроизвели небесные вариации поглощения из AKQ22 на рис. 3. Здесь же кривыми показаны проекции основных плоскостей слоев пояса Гулда и Цефея—Хамелеона на небесную сферу, полученные для AKQ22. Мы подписали крупные комплексы облаков.

Рисунок 3 показывает, что комплекс в Хамелеоне (Chamaeleon Complex), Южной Короне (Corona Australis Complex вокруг звезды R CrA), комплекс в южной части созвездия Орла (Aquila South Complex), в Цефее (Serpens Flare) и комплекс около Полярной звезды (Polaris Flare), судя по их координатам, принадлежат слою Цефея—Хамелеона. Более того, рис. 3 показывает, что все крупные комплексы облаков, за исключением комплекса облаков Pegasus, располагаются вдоль основных плоскостей трех рассматриваемых слоев. Это подтверждает, что наша модель успешно описывает пространственное распределение крупнейших пылевых облаков в ближайшем килопарсеке.

Интересным сюрпризом является то, что основные плоскости слоев в поясе Гулда и в Цефее—Хамелеоне пересекают основную плоскость Галактики примерно в одном месте, около $|l| \approx 90^\circ$, т.е. около оси Y , хотя их углы наклона к экватору в табл. 1 несколько различны: $B_{\text{tilt}} = 15^\circ \pm 3^\circ$ и $C_{\text{tilt}} = -28^\circ \pm 13^\circ$. Это формирует симметричную структуру с двумя слоями, стороны которых, удаленные от экватора, ориентированы одинаково, вдоль оси центр—антицентр Галактики. Отметим, что эта симметричная структура ни в коей мере не предполагалась нашей моделью изначально.

Хотя основные плоскости слоев примерно симметричны, основные облака и области повышенного поглощения — нет. Эта важная разница между слоями в поясе Гулда и в Цефее—Хамелеоне видна из табл. 1 и рис. 1–3. Максимальное поглощение в поясе Гулда предсказывается моделью и наблюдается в областях пояса, наиболее удаленных от основной плоскости Галактики. Это не так для слоя Цефея—Хамелеона.

Стандартные отклонения невязок A_V в табл. 1 для G17 и LBV19 гораздо меньше, чем для GSZ19 и AKQ22. Для объяснения этого стоит помнить, что невязки между данными и моделью вызваны естественными флуктуациями пылевой среды, ошибками данных и ошибками модели (см. детальный

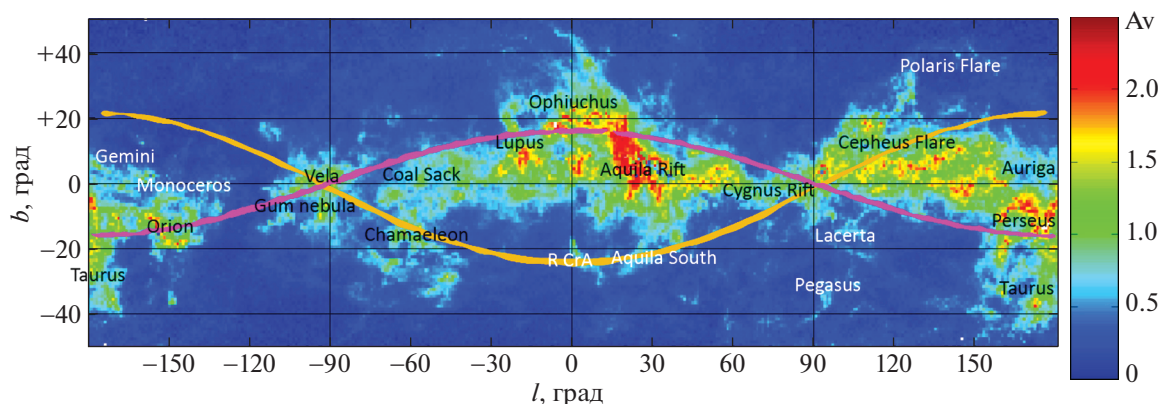


Рис. 3. Поглощение A_V из АКQ22, осредненное в ячейках размером 1×1 квадратный градус, в зависимости от галактических координат. Проекция основных плоскостей слоев в поясе Гулда и в Цифее–Хамелеоне показаны фиолетовой и коричневой кривыми соответственно. Подписаны наиболее заметные комплексы облаков ближайшего килопарсека. A_V представлено цветовой шкалой справа.

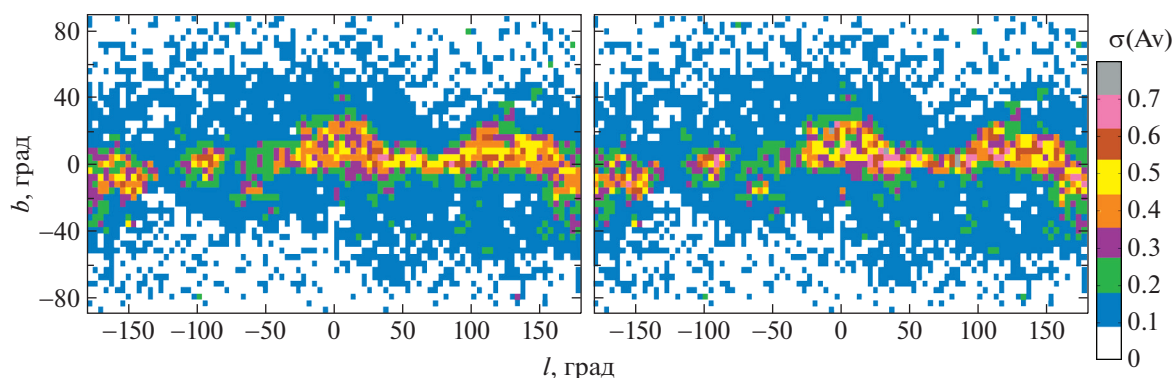


Рис. 4. Стандартное отклонение оценок поглощения A_V из АКQ22 (слева) и стандартное отклонение невязок A_V вида ‘АКQ22 минус модель’ (справа), вычисленные в ячейках размером 4×4 квадратных градуса, в зависимости от галактических координат. Значения представлены цветовой шкалой справа.

анализ Гончарова, 2019). Флуктуации проявляются только в АКQ22 (в наборе данных с поглощениями для индивидуальных звезд), и в GSZ19 (на карте с высоким разрешением). Как отмечено во ‘Введении’, в G17 и LBV19 флуктуации сильно сглажены и не вносят вклада в невязки.

Таблица 1 представляет только средние стандартные отклонения невязок A_V по всему небу. Но они сильно варьируются в зависимости от координат, особенно от широты. На рис. 4 показаны стандартное отклонение оценок поглощения A_V из АКQ22 и стандартное отклонение невязок A_V вида ‘АКQ22 минус модель’ в зависимости от галактических координат. Первая величина включает естественные флуктуации пылевой среды и ошибки данных. Ее типичные значения — 0.08^m и 0.37^m в высоких и низких широтах соответственно. Декларированные авторами АКQ22 ошибки в высоких широтах сравнимы со стандартным отклонением оценок поглощения. Поэтому для оценки флуктуаций среды мы привлекли результат прямых наблюдений — дисперсию цвета для выборки красных ги-

гантов сгущения. Эта выборка была использована при создании предыдущей версии модели Гончаровым, Мосенковым (2021б). Наблюдаемая дисперсия цвета включает флуктуации пылевой среды и дисперсию нормального цвета гигантов сгущения из-за разнообразия их собственных характеристик. Последняя величина достаточно точно предсказывается моделями внутреннего строения и эволюции звезд, как показано Гончаровым, Мосенковым (2021б). В итоге мы получили оценку стандартного отклонения $\sigma(A_V) = 0.06$ в высоких широтах из-за флуктуаций пылевой среды.

Типичные значения стандартного отклонения невязок ‘АКQ22 минус модель’ — 0.09^m и 0.40^m в высоких и низких широтах соответственно, то есть несколько больше, чем типичные значения стандартного отклонения оценок поглощения из АКQ22, так как включают еще и ошибки модели. Исключив вклад ошибок АКQ22, получаем оценку точности предсказаний нашей моделью поглощения для звезды или точки пространства, которая

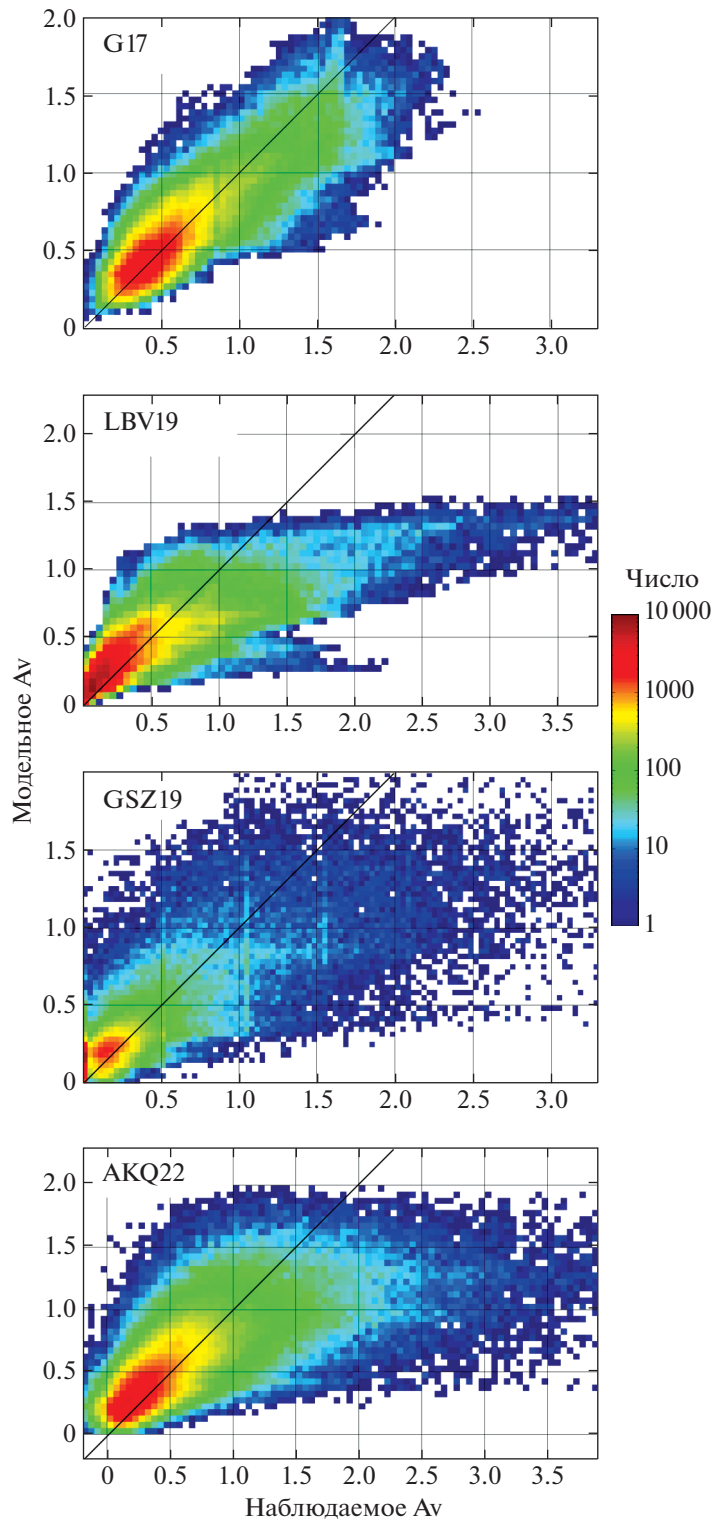


Рис. 5. Оценки поглощения A_V из наборов данных в сопоставлении с предсказаниями модели для случайно отобранных 256 000 звезд/точек. Число звезд/точек в каждой ячейке A_V показано цветовой шкалой справа.

меняется от 0.07^m до 0.37^m в высоких и низких широтах соответственно.

Доминирование флуктуаций в обеих величинах, представленных на рис. 4, проявляется и в очень

схожих вариациях этих величин по небу, особенно в высоких широтах. Детальное сравнение этих величин в каждой ячейке позволило нам вычислить их квадратичные разности и их зависимость от ши-

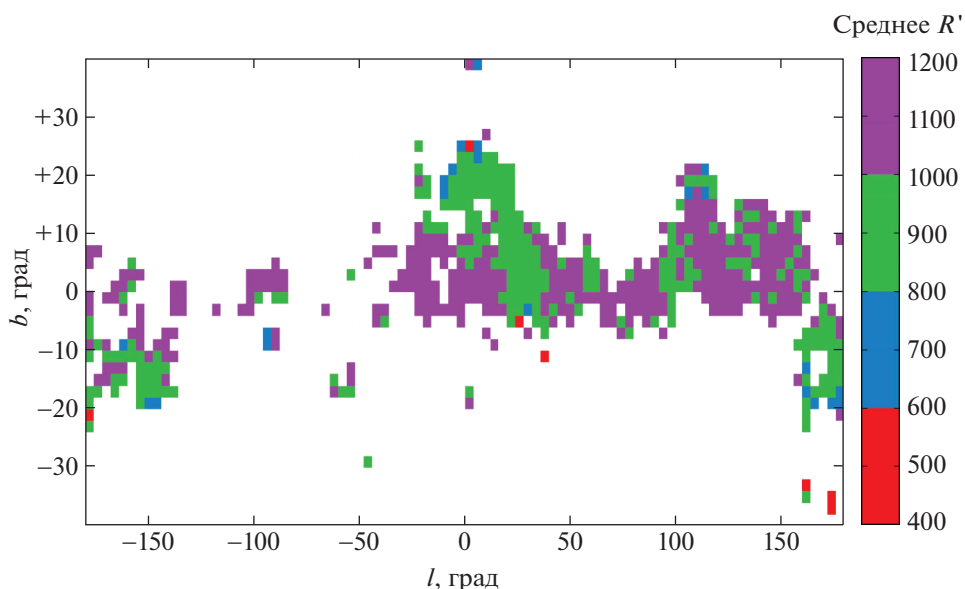


Рис. 6. Среднее расстояние $R' \equiv (X^2 + Y^2)^{0.5}$ (показано цветовой шкалой справа) для 12 921 звезд из АКQ22 с $A_V > 2.3^m$ в зависимости от галактических координат.

роты. Типичны величины $(0.09^2 - 0.08^2)^{0.5} = 0.04^m$ и $(0.40^2 - 0.37^2)^{0.5} = 0.15^m$ в высоких и низких широтах соответственно. Эти значения характеризуют точность предсказаний модели при игнорировании флуктуаций среды. Флуктуации игнорируются, например, если рассматривается среднее или медианное поглощение для протяженного объекта (галактики, звездного скопления, пылевого облака и т.п.) или для небольшой области пространства. В этих случаях предсказания нашей модели должны быть очень точны.

Для сравнения отметим, что при неопределенности индивидуального поглощения АКQ22 $\sigma(A_V) = 0.15$ поглощение для протяженного объекта в высоких широтах определяется с такой же, как у нашей модели, точностью 0.04^m только при осреднении оценок поглощения из АКQ22 для $(0.15/0.04)^2 = 14$ звезд, проецирующихся на этот объект. Следовательно, только редкие наиболее крупные внегалактические объекты обеспечены необходимым числом проецирующихся на них звезд АКQ22 для получения столь же точной средней или медианной оценки поглощения, как с помощью нашей модели.

Однако здесь мы имеем в виду только точность в случайном отношении. Систематические ошибки предсказаний нашей модели воспроизводят систематические ошибки наборов данных, использованных при вычислении ее параметров. Кроме того, наша модель, как любая, имеет систематические ошибки из-за ее неизбежного неполного отражения реальности. Некоторое представление об этих систематических ошибках дает приведенное далее сравнение предсказаний нашей модели с наиболее

точными оценками поглощения для звездных скоплений и переменных звезд.

При анализе табл. 1 стоит учесть, что систематические ошибки данных и модели могут не проявиться в рассматриваемых нами стандартных отклонениях невязок и коэффициентах корреляции. Поэтому меньшее стандартное отклонение или больший коэффициент корреляции для какого-либо набора данных не говорят о том, что этот набор точнее остальных.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравним наблюдаемые и предсказанные оценки поглощений напрямую. На рис. 5 мы сопоставили случайно отобранные поглощения из наборов данных с соответствующими предсказаниями нашей модели. Для всех наборов данных большинство низких оценок поглощения слегка переоценено нашей моделью (красное облако ячеек на графике смещено вверх относительно биссектрисы). Это является результатом поиска баланса между большим числом звезд/точек с малым поглощением и немногочисленными звездами/точками с очень большим поглощением, для того чтобы получить нулевую среднюю невязку.

Звезды/точки с очень большим поглощением находятся преимущественно на краю рассматриваемого пространства и, видимо, принадлежат галактическим структурам вне геометрии нашей модели. Анализ этих звезд/точек позволяет понять ограничения нашей модели. На рис. 6 показано среднее расстояние вдоль основной плоскости Галактики, определяемое нами как $R' \equiv (X^2 + Y^2)^{0.5}$,

для 12921 гигантов из АКQ22 с высоким поглощением $A_V > 2.3^m$ в зависимости от галактических координат⁶. Видно, что такие гиганты очень редки до $R' < 800$ пк (красные и голубые символы). Сравнение рис. 6 с рис. 3 показывает, что эти гиганты принадлежат облакам пояса Гулда и облаку Aquila South⁷. Гиганты с $A_V > 2.3^m$ более многочисленны при $800 < R' < 1000$ пк (зеленые символы на рис. 6), но они все еще принадлежат преимущественно экваториальному слою и поясу Гулда. Большинство гигантов с $A_V > 2.3^m$ имеют $R' > 1000$ пк (фиолетовые символы) и, в противоположность более близким гигантам, принадлежат облакам Serpheus Flare, Cygnus Rift, Vela Molecular Ridge, Monoceros Complex и облакам в направлении на центр Галактики, как видно из сравнения рис. 6 с рис. 3.

В связи с этим отметим, что все наборы данных дают согласующиеся оценки большой полуоси основной плоскости пояса Гулда со средним $B_{\text{major}} = 743 \pm 61$ пк. Это предполагает, что пыль пояса находится исключительно в пределах ближайшего килопарсека, хотя заслоняет и более далекие объекты. В противоположность пыли пояса Гулда, только часть пыли слоя Цефея–Хамелеона находится внутри рассматриваемого нами пространства, как следует из согласующихся для наборов данных оценок большой полуоси $C_{\text{major}} > 1000$ пк. Это согласуется с другими оценками расстояния до комплекса облаков Serpheus Flare (см. Кун и др., 2008; Чен и др., 2020, и ссылки в них).

Возвращаясь к звездам/точкам с малым поглощением на рис. 5, отметим их дихотомию для GSZ19. Как и для остальных наборов данных, множество точек (оранжевое сгущение на графике) показывает нормальное или логнормальное распределение как по наблюдаемым, так и по предсказанным поглощениям. Но другое множество точек (красный вертикальный столбик на графике) показывает нулевое наблюдаемое и ненулевое предсказанное поглощение. Важно, что это поглощение относится не к пространству вблизи Солнца, так как GSZ19 не дает поглощений в радиусе около 300 пк от Солнца, как отмечено в разделе ‘Данные’. Точки с нулевым поглощением по GSZ19 находятся в высоких широтах вдали от основной плоскости Галактики. Таким образом, в этих точках GSZ19 ошибочно показывает нулевое поглощение поперек всего галактического слоя пыли. Эта дихотомия, то есть и нулевые, и существенно ненулевые оценки

поглощения в высоких широтах, была выявлена Грином и др. (2018), которые отметили, что для лучей зрения с малым объемом данных первая версия их карты (Грин и др., 2015) имеет тенденцию присваивать нулевые покраснения в тех случаях, когда истинное покраснение меньше нескольких сотых долей звездной величины. Видно, что эта особенность сохраняется в последней версии карты GSZ19 и проявляется при оценке поглощения для высокоширотных объектов. Например, Гончаров, Мосенков (2021a) обнаружили, что GSZ19 получили надежные существенно ненулевые оценки поглощения *внутри* высокоширотных галактических шаровых скоплений, используя на каждом луче зрения фотометрию десятков звезд — членов скоплений. Но для областей неба *вокруг* этих скоплений GSZ19 получили ненадежные нулевые или почти нулевые оценки поглощения из-за использования лишь единичных звезд на каждом луче зрения.

Важно, что эти ошибочные нулевые поглощения сильно искажают некоторые параметры нашей модели, найденные по GSZ19. Например, большая доля нулевых поглощений вдали от основной плоскости Галактики ведет к недооценке среднего поглощения там. Это приводит к нереально быстрому уменьшению поглощения с $|Z|$ и, следовательно, к заниженной оценке E_{scale} по GSZ19 (отметим, что заниженная оценка E_{scale} по LBV19 вызвана ограничением $|Z| < 400$ пк). Более того, чтобы следовать экспоненциальному уменьшению поглощения с $|Z|$, наша модель компенсирует недооценку поглощения вдали от основной плоскости Галактики переоценкой поглощения вблизи плоскости, а это ведет к переоценке E и $E_{\text{amplitude}}$ по GSZ19. Это замечание показывает связь между параметрами нашей модели, характеризующими пространственную плотность распределения пыли, и еще раз подчеркивает упомянутое ранее деление параметров модели на две категории. Видно, что полученные характеристики пространственной плотности распределения пыли могут быть отягощены значительными систематическими ошибками и нуждаются в привлечении более точных наборов данных.

Предположив, что в областях пространства с малым поглощением оценки АКQ22 систематически более точны, чем оценки GSZ19, мы можем заменить нулевые поглощения GSZ19 на более реалистичные оценки. На рис. 7 мы сравниваем поглощения АКQ22 и GSZ19 для 664 939 гигантов, имеющих оценки поглощения из АКQ22. Видно, что минимальные поглощения GSZ19 систематически недооценены по сравнению с АКQ22 на $\Delta A_V = 0.12^m$. Такая поправка устранила бы упомянутую дихотомию и объединила бы все оценки малых поглощений из GSZ19 вокруг медианы $A_V = 0.13^m$.

⁶ Только 12921 из 993291 гигантов АКQ22 (1.3%) демонстрируют столь высокое поглощение, которое не предсказывается нашей моделью.

⁷ Рисунки 3 и 6 имеют разную шкалу широт вдоль оси ординат.

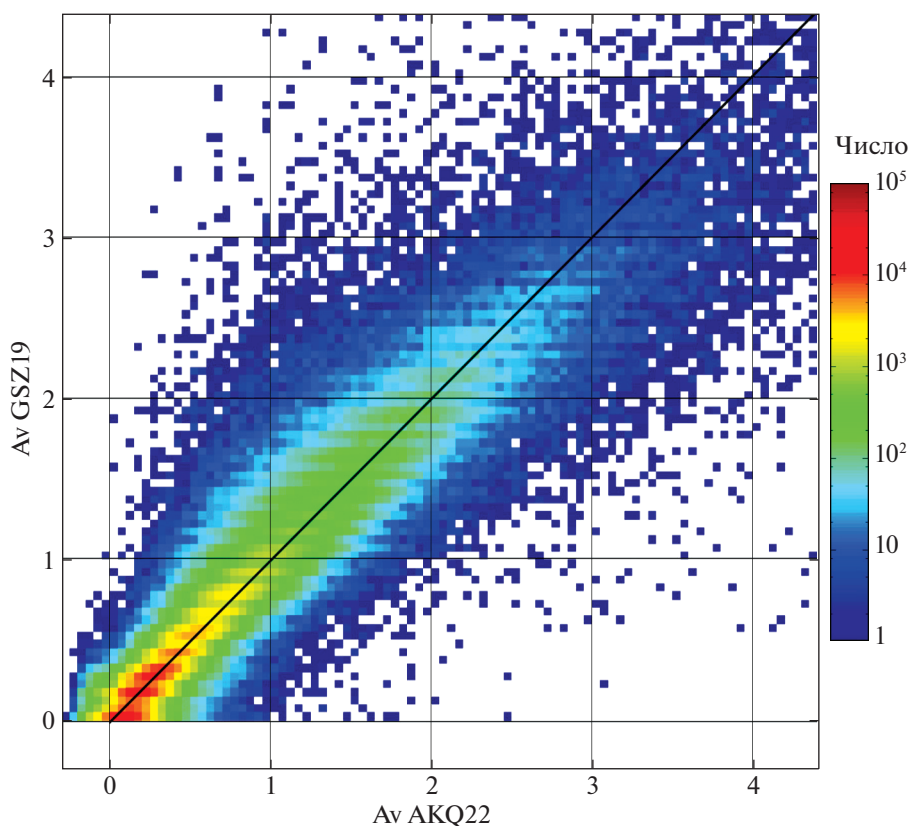


Рис. 7. Оценки A_V из АКQ22 и GSZ19 для 664 939 гигантов АКQ22. Число гигантов в каждой ячейке A_V показано цветовой шкалой справа.

При $|b| > 62^\circ$ все наборы данных показывают неизменные статистические характеристики. Поглощение в этом диапазоне высоких широт вдали от основной плоскости Галактики можно рассматривать как поглощение поперек всего галактического полуслоя пыли над или под Солнцем. LBV19, GSZ19, АКQ22 и G17 оценивают это поглощение как $A_V = 0.07^m$, 0.11^m , 0.12^m и 0.20 соответственно (с учетом исправленных нулевых поглощений GSZ19). Сводка иных оценок этого поглощения и сопутствующий анализ систематических ошибок даны Гончаровым, Мосенковым (2021a).

Наиболее популярные двумерные карты покраснения по наблюдениям эмиссии пыли Шлегеля и др. (1998) и Майснера, Финкбайнера (2015) оценивают поглощение поперек всего галактического полуслоя пыли над или под Солнцем как $A_V = 0.06^m$ и 0.05^m соответственно, если принять закон поглощения SSM89 с $R_V = 3.1$, и, следовательно, недооценивают поглощение в высоких широтах вдали от основной плоскости Галактики по сравнению со всеми рассматриваемыми наборами данных. Оценки Шлегеля и др. (1998) и Майснера, Финкбайнера (2015) опираются на калибровки эмиссии пыли по покраснению $E(B - V)$ для множества звезд и эллиптических галактик. Как

отмечено самими авторами, точность этих калибровок низка: для карты Шлегеля и др. (1998) она фактически приводит к оценке $A_V = 0.06 \pm 0.09^m$ для поглощения поперек всего галактического полуслоя пыли над или под Солнцем. Более того, Шлегель и др. (1998), калибруя эмиссию пыли по подсчетам числа галактик, получили вдвое большую оценку (около $A_V = 0.12 \pm 0.09^m$), чем при калибровке по цвету галактик. Видно, что первая и тем более вторая оценки формально не противоречат упомянутым оценкам по LBV19, GSZ19, АКQ22 и G17, если учесть их неопределенности.

Видимо, из всех рассматриваемых оценок поглощения поперек галактического слоя пыли наиболее точна оценка АКQ22, как результат недавнего исследования с использованием наименьшего количества предположений и калибровок, опирающегося на наиболее точные оценки параллакс и фотометрии для рекордно большого числа (сотен миллионов) звезд. Оценка АКQ22 заставляет не только пересмотреть оценки поглощения для высокоширотных внегалактических объектов, но и требует объяснить, как значительное количество пыли оказалось вдали от основной плоскости Галактики. Наша модель как раз является шагом в таком

Таблица 2. Значения информационного критерия Байеса для четырех наборов данных (случайных подвыборок по 256 000 звезд/точек) и трех версий нашей модели (новой версии с двумя слоями, с тремя слоями и четвертой версии Гончарова, Мосенкова, 2021б)

Версия модели	G17	LBV19	GSZ19	AKQ22
Четвертая версия	−860 382	−472 487	−464 302	−451 615
2 слоя	−835 303	−695 350	−554 846	−509 382
3 слоя	−890 251	−733 623	−568 441	−524 203

объяснении, предполагая, что пыль вдали от плоскости Галактики содержится преимущественно в пылевых структурах, наклоненных к этой плоскости. Таким образом, наша модель сводит вопрос о появлении пыли вдали от основной плоскости Галактики к вопросу о возникновении и эволюции пояса Гулда и слоя пыли Цефея–Хамелеона.

Впрочем, новые оценки поглощения поперек галактического слоя пыли, видимо, не требуют радикального пересмотра связанных с ними характеристик внегалактических объектов. Например, разница между оценками Шлегеля и др. (1998) и АКQ22 может быть устранена в первом приближении с помощью постоянной по всему небу поправки $\Delta E(B - V) = 0.02$. Столь малая поправка, например, почти не изменит дисперсию, медиану, среднее и другие характеристики цвета эллиптических галактик без текущего звездообразования, которые образуют на диаграммах ‘цвет–абсолютная звездная величина’ компактную ‘красную последовательность’ со сравнительно малой дисперсией по цвету (Чилингарян, Золотухин, 2012; Чилингарян и др., 2017). Действительно, искажение цвета ‘красной последовательности’ на $\Delta B - V = 0.02$ из-за недооценки покраснения, видимо, меньше неопределенности предсказаний современных моделей. Кроме того, наша оценка флуктуаций поглощения в высоких широтах $\sigma(A_V) = 0.06$ вносит незначительный вклад $\sigma(E(B - V)) = 0.02$ в дисперсию цвета ‘красной последовательности’. Более того, для галактик, как протяженных объектов, эта дисперсия в значительной мере сглаживается.

Чтобы проверить необходимость использования трех слоев пыли в нашей модели, мы использовали те же наборы данных для вычисления параметров модели, но без слоя Цефея–Хамелеона или только с одним экваториальным слоем. Дополнительно мы убедились в преимуществе новой версии модели по сравнению с предыдущей версией, представленной Гончаровым, Мосенковым (2021б). Во всех этих случаях мы получили стандартные отклонения невязок A_V на несколько сотых долей выше, а коэффициенты корреляции на несколько сотых

долей ниже тех, которые представлены в табл. 1 для новой версии модели с тремя слоями.

Кроме того, мы провели дополнительную проверку преимуществ новой версии модели. При этом учтено разное число параметров в разных версиях модели. Мы использовали информационный критерий Байеса (Bayesian information criterion, BIC). BIC вычисляет производительность модели с учетом штрафа за число параметров. Используя BIC, можно увидеть, обосновано ли введение дополнительных параметров. Для данных x_i и модельных предсказаний \hat{x}_i значение BIC вычисляется как

$$\text{BIC} = n \ln \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \right) + k \ln(n),$$

где k — число параметров, а n — число рассматриваемых звезд/точек. Меньшая величина BIC означает лучшее соответствие модели и данных. Полученные значения BIC представлены в табл. 2. Новая версия нашей модели с тремя слоями и 29 параметрами во всех случаях дает BIC меньше (все значения в табл. 2 отрицательны!), т.е. выглядит лучше, чем версия с двумя слоями (без слоя Цефея–Хамелеона) и 17 параметрами и предыдущая версия модели с 18 параметрами. Таким образом, выделение отдельного слоя Цефея–Хамелеона обосновано.

Мы аппроксимировали четыре рассматриваемых нами набора данных упомянутыми во ‘Введении’ трехмерными моделями Арену и др. (1992), Дриммеля и др. (2003), Аморес, Лепине (2007) и простейшей моделью. Все эти модели дают стандартные отклонения невязок A_V на несколько сотых долей выше, а коэффициенты корреляции на несколько сотых долей ниже, чем наша новая модель. Это ожидаемо после анализа моделей в их применении к большой выборке гигантов Gaia Гончаровым, Мосенковым (2021б).

Множители R , $\min(R, B_{R\max})$ и $\min(R, C_{R\max})$ в уравнениях (7)–(9) предполагают пропорциональность поглощения и расстояния вблизи Солнца, т.е. постоянство пространственной плотности распределения (объемной плотности) пыли. Наши

результаты показывают, что это предположение правдоподобно. Это противоречит распространенному представлению о поясе Гулда как о газопылевом торе с областью пониженной объемной плотности газа и пыли в его центре. Эта область имеет радиус около 100 пк вокруг Солнца и называется Местным Пузырем. До недавнего времени низкая точность измерения покраснений/поглощений и расстояний не позволяла ответить, действительно ли Местный Пузырь является областью пониженной объемной плотности среды. Гончаров, Мосенков (2019) показали, что измерения межзвездной поляризации в комбинации с измерениями эквивалентной ширины абсорбционных линий Na I и Ca II более надежно очерчивают границы Пузыря, чем измерения покраснения или поглощения, и заодно показывают, что Пузырь является не областью пониженной плотности распределения среды, а областью ее повышенной ионизации. Анализ Гончаровым, Мосенковым (2019) всего разнообразия измерений внутри и снаружи Пузыря (покраснения, поглощения, поляризации и абсорбционных линий) показал, что только карта LBV19 изображает Пузырь как область пониженной объемной плотности пыли, и это является, скорее всего, проявлением систематических ошибок LBV19. Настоящее исследование позволяет нам проверить, какие наборы данных показывают падение объемной плотности пыли в Пузыре.

Для проверки этого мы вычислили параметры нашей модели с использованием G17, LBV19 и АКQ22 (GSZ19 не дает поглощений вблизи Солнца), но обнулив все поглощения в Местном Пузыре, т.е. допустив область пониженной объемной плотности пыли вблизи Солнца⁸. Мы варьировали радиус Пузыря от 0 до 200 пк. Оказалось, что только для LBV19 и только в радиусе меньше 80 пк от Солнца обнуление поглощений уменьшает стандартное отклонение невязок A_V и увеличивает коэффициент корреляции, т.е. улучшает соответствие данных и модели. Таким образом, LBV19, в отличие от G17 и АКQ22, предполагает область пониженной объемной плотности распределения пыли в радиусе 80 пк от Солнца.

ПРИМЕНЕНИЕ К СКОПЛЕНИЯМ И ПЕРЕМЕННЫМ ЗВЕЗДАМ

Для оценки качества нашей модели мы сравнили ее предсказания с наиболее точными оценками поглощения для рассеянных и шаровых скоплений, а

также для переменных звезд типа RR Лиры и классических цефеид. Мы отобрали оценки, полученные для переменных звезд на основе зависимостей период—светимость—металличность, а для скоплений — путем сопоставления диаграмм ‘цвет—величина’ с теоретическими изохронами. Кроме того, мы рассмотрели оценки поглощения для множества переменных RR Лиры в ближайшем килопарсеке, в шаровом скоплении NGC288 и в карликовой галактике Ursa Major II, полученные Клементини и др. (2022) из анализа данных Gaia DR3 на основе зависимости период—цвет—амплитуда для переменных звезд в фундаментальной моде. Все использованные нами оценки покраснения или поглощения пересчитаны в оценки поглощения A_V с использованием закона поглощения CCM89 с $R_V = 3.1$. Сравнение оценок для одних и тех же объектов из разных литературных источников выявило разности между ними, которые иногда значительно превосходят неопределенности, декларированные авторами. Это говорит о недооценке авторами систематических ошибок. Отметим, что некоторый вклад в разногласие оценок могут вносить нерассматриваемые нами возможные пространственные вариации закона поглощения.

Для предсказаний модели использован набор параметров из табл. 1 для АКQ22, как основанный на наиболее обширном, точном и новом материале. Точность предсказаний зависит от широты. Как отмечено ранее, наша модель дает неточные предсказания и для точечных, и для протяженных объектов вдали от Солнца в низких широтах, при $(X^2 + Y^2)^{0.5} > 1200$ пк и $|b| < 24^\circ$. Сравнение с оценками для скоплений и переменных звезд подтвердило это. Далее такие скопления и звезды не рассматриваются, за исключением некоторых наглядных примеров.

Сравнение для 34 галактических шаровых скоплений и карликовой галактики Ursa Major II представлено на рис. 8. Мы рассмотрели все известные шаровые скопления с $|b| > 24^\circ$ и ближе 40 кпк от Солнца. Для более далеких скоплений фотометрия на диаграмме ‘цвет—величина’ недостаточно глубока для точных оценок. Кроме них мы рассмотрели три скопления, чтобы показать ограничения нашей модели: NGC6121 и NGC6171 находятся близко к галактическому экватору ($b \approx 16^\circ$ и $b \approx 23^\circ$ соответственно) и при этом далеко от Солнца (2.2 и 6.4 кпк соответственно), а Palomar 15 — слишком далеко от Солнца (≈ 45 кпк). Мы использовали оценки покраснения/поглощения из исследований Вагнера-Кайзера и др. (2016), Вагнера-Кайзера и др. (2017), Доттера и др. (2010), Доттера и др. (2011), Беллаццини и др. (2002), Коха, МакВильяма (2014), Хамрика и др. (2021), Ортолани, Граттон (1990) и Хамрена и др. (2013), отдавая им

⁸ Обнуление поглощений ближе 40 пк от Солнца совершенно не изменяет стандартные отклонения невязок A_V и коэффициенты корреляции, так как поглощения здесь и так очень близки к нулю.

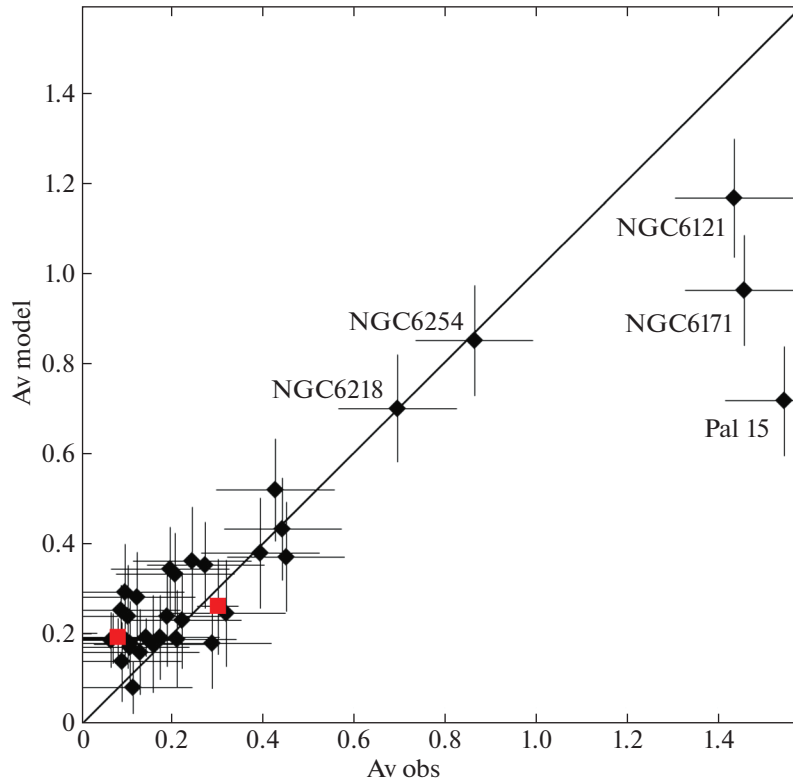


Рис. 8. Оценки A_V для галактических шаровых скоплений из литературы в сопоставлении с предсказаниями нашей модели — черные ромбы. Оценки Клементини и др. (2022) отмечены красными квадратами.

предпочтение именно в таком порядке, если для скопления есть оценки в разных публикациях.

Для всех взятых из литературы оценок покраснения/поглощения для шаровых скоплений мы приняли наиболее реалистичную на наш взгляд оценку неопределенности $\sigma(A_V) = 0.13$. Для оценок из Клементини и др. (2022) мы приняли неопределенности, декларированные авторами. Отметим, что хотя в наиболее популярной базе данных шаровых скоплений Харриса (1996, последняя версия 2010 г.) для всех известных галактических шаровых скоплений есть оценки покраснения/поглощения, однако многие из них либо вычислены до 1990 г. с использованием изохрон очень низкой точности, либо вообще взяты из карты Шлегеля и др. (1998), недооценивающей поглощение в средних и высоких широтах, как отмечено ранее.

Рисунок 8 показывает хорошее согласие предсказаний нашей модели с оценками из литературы для большинства шаровых скоплений. Однако обособленная группа скоплений демонстрирует некоторое разногласие между наблюдаемым $A_V \approx 0.10$ и предсказанным $A_V \approx 0.25$ поглощениями. Это говорит о возможной переоценке небольших поглощений нашей моделью.

Несмотря на большое число недавних публикаций с оценками поглощения для рассеянных

скоплений, трудности в выявлении членов скопления, небольшое число членов, вырожденность поглощения и металличности, возможное изобилие пыли внутри скопления и другие трудности снижают точность оценок. Примеры сравнительно точных оценок для скоплений в совершенно разных направлениях даны Ниу и др. (2020), Монтейро и др. (2020), Хе и др. (2021), Джексон и др. (2022). На рис. 9 показаны эти оценки поглощения в сравнении с предсказаниями нашей модели. Для оценок Хе и др. (2021) принята неопределенность $\sigma(A_V) = 0.2$. Видно приемлемое согласие как для скоплений с $(X^2 + Y^2)^{0.5} < 1000$ пк, так и для многих с $1000 < (X^2 + Y^2)^{0.5} < 1200$ пк. Как и для шаровых скоплений, разногласие наблюдаемых и предсказанных оценок для небольших поглощений говорит в пользу некоторой их переоценки нашей моделью.

Многие скопления, для которых наблюдаемое поглощение гораздо больше предсказанного, содержат области текущего звездообразования и, следовательно, пыль внутри скопления. Эта пыль не учитывается нашей моделью. Поэтому такие скопления, известные нам, исключены из рассмотрения. Для примера нами оставлено и отмечено на рис. 9 скопление NGC 2183, погруженное в газопылевое облако.

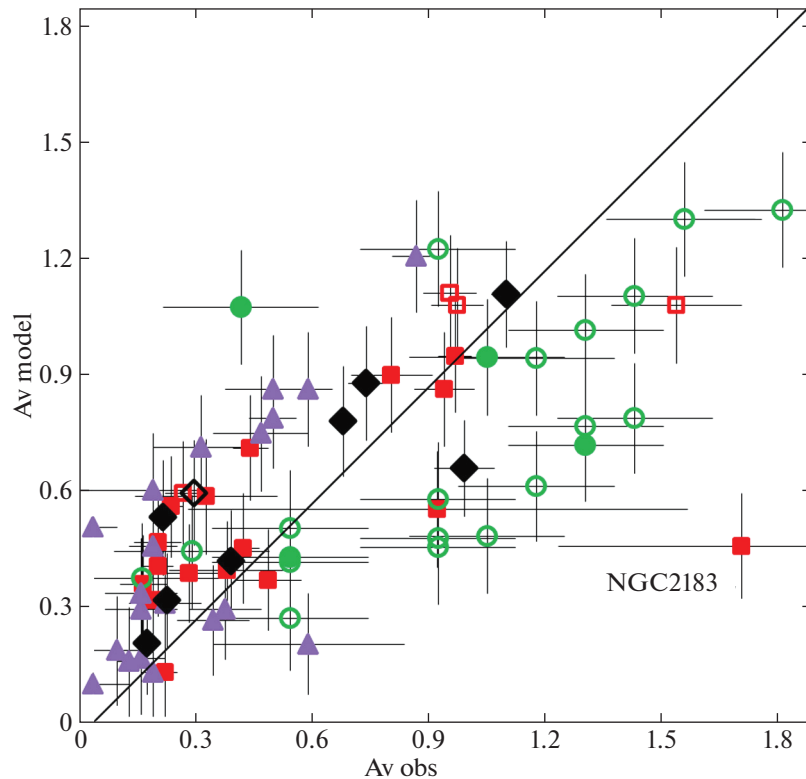


Рис. 9. Оценки A_V для рассеянных скоплений из литературы в сопоставлении с предсказаниями нашей модели: из Ниу и др. (2020) — черные ромбы, Монтейро и др. (2020) — красные квадраты, Хе и др. (2021) — зеленые круги, Джексон и др. (2022) — фиолетовые треугольники. Сплошными и открытыми символами отмечены скопления в пределах $(X^2 + Y^2)^{0.5} < 1000$ и $1000 < (X^2 + Y^2)^{0.5} < 1200$ пк соответственно.

На рис. 10 показаны оценки поглощения для цефеид и сверхгигантов из работы Ковтюха и др. (2008) и цефеид из Лазовика, Расторгуева (2020) в сравнении с предсказаниями нашей модели. Для сверхгигантов принята неопределенность $\sigma(A_V) = 0.15$. Разногласия между оценками поглощения для общих цефеид из этих двух работ часто существенно превосходят декларируемые неопределенности. Как и для скоплений, видно, что небольшие поглощения, возможно, переоценены нашей моделью. При наблюдаемой $A_V > 1.2$ характер разногласий между наблюдениями и предсказаниями меняется для цефеид, но, видимо, не для сверхгигантов. Следовательно, эти разногласия нельзя полностью объяснить ошибками нашей модели.

На рис. 11 показаны оценки поглощения для 39 и 131 переменных RR Лиры из исследований Дамбиса и др. (2013) и Клементини и др. (2022) соответственно в сопоставлении с предсказаниями нашей модели. Мы не использовали оценки Дамбиса и др. (2013) для звезд с $|b| > 25^\circ$, так как они воспроизводят оценки из модели Дриммеля и др. (2003). Для оценок Дамбиса и др. (2013) принята неопределенность $\sigma(A_V) = 0.15$. Данные Клементини и др. (2022) очищены от посторонних

звезд, ошибочно идентифицированных в проекте Gaia как переменные RR Лиры, с помощью ограничения по абсолютной величине для широкой полосы Gaia $0 < M_G < 1.43$. Отметим, что для многих переменных RR Лиры Клементини и др. (2022) получили отрицательные поглощения. Даже медиана поглощения для звезд RR Лиры при $|b| > 50^\circ$ отрицательна: $A_V = -0.01$. Более того, согласно Клементини и др. (2022), в высоких широтах поглощение убывает с расстоянием. Мы отобрали близкие звезды RR Лиры как звезды с параллаксом Gaia больше 0.5 мсек. дуги и относительной точностью параллакса лучше 0.1. Для них медиана поглощения также очень мала: $A_V = 0.02$. Таким образом, фактически оценки Клементини и др. (2022) предполагают нулевое поглощение сквозь весь слой пыли поперек Галактики в районе Солнца. Соответственно, эта нереалистичная оценка создает видимое на рис. 11 расхождение наблюдений с предсказаниями нашей модели. Видимо, калибровки для переменных RR Лиры должны быть пересмотрены. А общий вопрос о поглощении сквозь весь слой пыли поперек Галактики требует особого внимания.

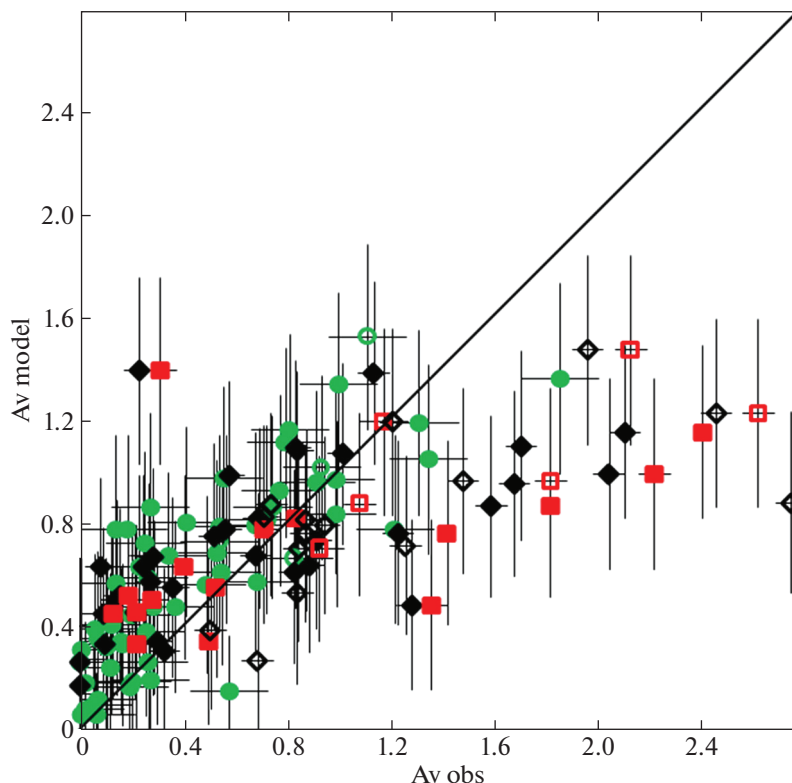


Рис. 10. Оценки A_V для цефеид и сверхгигантов из литературы в сопоставлении с предсказаниями нашей модели: цефеиды из Ковтюха и др. (2008) — черные ромбы, цефеиды из Лазовика, Расторгуева (2020) — красные квадраты, сверхгиганты из Ковтюха и др. (2008) — зеленые круги. Сплошными и открытыми символами отмечены звезды в пределах $(X^2 + Y^2)^{0.5} < 1000$ и $1000 < (X^2 + Y^2)^{0.5} < 1200$ пк соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании мы представили новую версию нашей трехмерной аналитической модели пространственных вариаций межзвездного поглощения. Это пятая версия модели после представленных Гончаровым (2009), Гончаровым (2012б), Гончаровым (2019) и Гончаровым, Мосенковым (2021б). Эта версия описывает трехмерное распределение пыли в ближайшем килопарсеке в трех пересекающихся слоях: вдоль основной плоскости Галактики, в поясе Гулда и в слое, проходящем через комплексы облаков в Цефее и Хамелеоне. Каждый слой имеет экспоненциальные вертикальные и синусоидальные долготные вариации пространственной плотности пыли. Экваториальный слой бесконечен вдоль осей X и Y и сдвинут относительно Солнца вдоль оси X . Остальные слои имеют конечные эллиптические основные плоскости, сдвинутые относительно Солнца по всем трем координатам.

Основные плоскости слоев, как оказалось, проходят вблизи всех крупнейших комплексов облаков ближайшего килопарсека: Gemini, Monoceros, Vela, Coal Sack, Cygnus Rift и Auriga для экваториального слоя, Taurus, Orion, Gum Nebula,

Lupus, Ophiuchus, Aquila Rift, Lacerta и Perseus для пояса Гулда, Chamaeleon, Corona Australis, Aquila South, Cepheus Flare и Polaris Flare для слоя Цефея–Хамелеона. Однако важнее то, что мы получили согласующиеся оценки 29 параметров нашей модели при использовании для их вычисления четырех наиболее точных и обширных наборов данных: поглощений для 993 291 гигантов из AKQ22, полученных по результатам Gaia, а также трех трехмерных карт покраснения G17, LBV19, GSZ19. Это обосновывает возможность использования нашей модели для предсказания поглощения в любой точке диффузной среды в ближайшем килопарсеке, а в высоких широтах ($|b| > 24^\circ$) — и далеко за его пределами. Точность предсказания поглощения A_V нашей моделью для звезды или точки пространства составляет от 0.07^m до 0.37^m для высоких и низких широт соответственно. Эта точность ограничена естественными флуктуациями межзвездной пылевой среды. Среднее или медианное поглощение для протяженных объектов или небольших областей пространства, когда игнорируются флуктуации среды, наша модель дает с очень высокой точностью от 0.04^m до 0.15^m для высоких и низких широт соответственно.

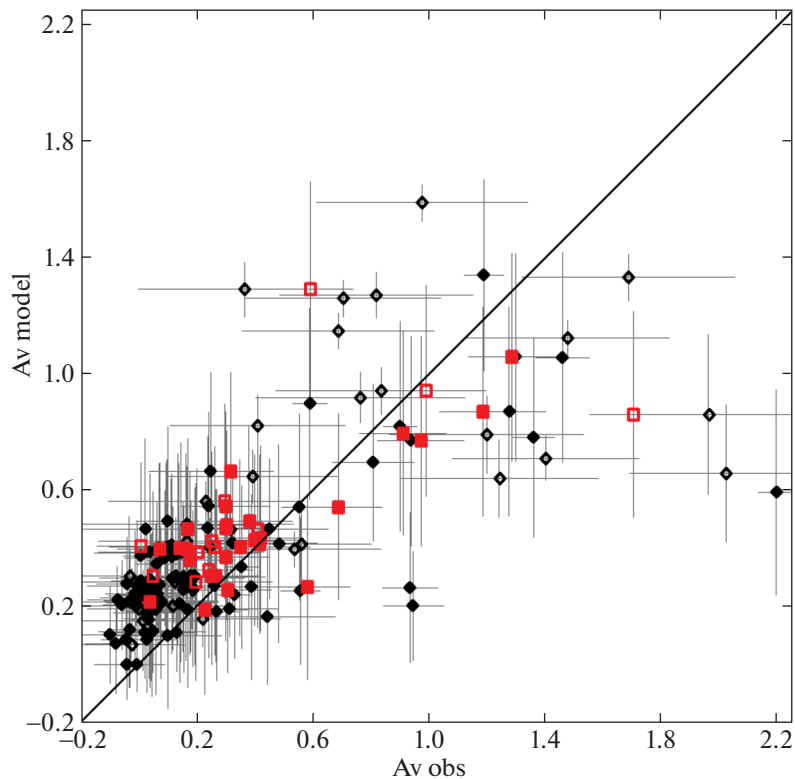


Рис. 11. Оценки A_V для переменных RR Лирь из исследований Дамбиса и др. (2013, красные квадраты) и Клементини и др. (2022, черные ромбы) в сопоставлении с предсказаниями нашей модели. Сплошными и открытыми символами отмечены звезды в пределах $(X^2 + Y^2)^{0.5} < 1000$ и $1000 < (X^2 + Y^2)^{0.5} < 1200$ пк соответственно.

Наклоненные к основной плоскости Галактики пылевые слои пояса Гулда и Цефея–Хамелеона, согласно нашей модели, дают основной вклад в поглощение в высоких широтах. Таким образом, наша модель количественно описывает свойства ‘контейнеров’ пыли, которые могут обеспечить сравнительно большое поглощение $A_V = 0.12^m$ сквозь весь полуслой галактической пыли над или под Солнцем, полученное недавно АКQ22 по результатам Gaia.

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 20-72-10052).

Мы благодарим Максима Ховричева за помощь в доступе к интернет-ресурсам, Антона Дряничкина, Евгения Евсеева, Марину Гаранину, Евгения Гордеева, Павла Попова, Наталию Светлову за помощь в вычислениях.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания.

В работе использованы ресурсы Страсбургского центра астрономических данных (<http://cdsweb.u-strasbg.fr>), включая базу данных

SIMBAD и сервис X-Match. Это исследование использует систему онлайн визуализации данных Filtergraph (Бургер и др., 2013, <https://filtergraph.com>). Эта работа использует результаты 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. Аморес, Лепине (E.B. Amôres and J.R.D. Lépine), *Astron. J.* **130**, 659 (2005).
2. Аморес, Лепине (E.B. Amôres and J. R. D. Lépine), *Astron. J.* **133**, 1519 (2007).
3. Андерс и др. (F. Anders, A. Khalatyan, A.B.A. Queiroz, C. Chiappini, J. Ardèvol, L. Casamiquela, F. Figueras, Ó. Jiménez-Arranz, C. Jordi, et al.), *Astron. Astrophys.* **658**, A91 (2022).
4. Арену и др. (F. Arenou, M. Grenon, and A. Gomez), *Astron. Astrophys.* **258**, 104 (1992).
5. Беллаццини и др. (M. Bellazzini, F.R. Ferraro, and R. Ibata), *Astron. J.* **124**, 915 (2002).
6. Бобылев В.В., *Астрофизика* **57**, 625 (2014) [V.V. Bobylev, *Astrophysics* **57**, 583 (2014)].

7. Бургер 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).
8. 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).
9. Вагнер-Кайзер и др. (R. Wagner-Kaiser, A. Sarajedini, T. von Hippel, D.C. Stenning, D.A. van Dyk, E. Jefferys, E. Robinson, N. Stein, J. Anderson, and W.H. Jefferys), *MNRAS* **468**, 1038 (2017).
10. Гая (Gaia Collaboration), *Astron. Astrophys.* **616**, A1 (2018).
11. Гая (Gaia collaboration), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021a).
12. Гая (Gaia collaboration), *Astron. Astrophys.* **649**, A3 (2021b).
13. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **35**, 862 (2009) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **35**, 780 (2009)].
14. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **36**, 615 (2010) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **36**, 584 (2010)].
15. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 15 (2012a) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 12 (2012a)].
16. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 108 (2012b) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 87 (2012b)].
17. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 776 (2012в) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 694 (2012с)].
18. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 521 (2017) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **43**, 472 (2017)].
19. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **45**, 650 (2019) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **45**, 605 (2019)].
20. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **470**, L97 (2017a).
21. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **472**, 3805 (2017b).
22. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **475**, 1121 (2018).
23. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **483**, 299 (2019).
24. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **500**, 2590 (2021a).
25. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **500**, 2607 (2021b).
26. 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).
27. 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.), *MNRAS* **478**, 651 (2018).
28. Грин и др. (G.M. Green, E.F. Schlafly, C. Zucker, J.S. Speagle, and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **887**, 93 (2019).
29. Дамбис и др. (A.K. Dambis, L.N. Berdnikov, A.Y. Kniazev, V.V. Kravtsov, A.S. Rastorguev, R. Seifako, and O.V. Vozyakova), *MNRAS* **435**, 3206 (2013).
30. 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).
31. Доттер и др. (A. Dotter, A. Sarajedini, J. Anderson, A. Aparicio, L.R. Bedin, B. Chaboyer, S. Majewski, A. Marín-Franch, A. Milone, et al.), *Astrophys. J.* **708**, 698 (2010).
32. Доттер и др. (A. Dotter, A. Sarajedini, and J. Anderson), *Astrophys. J.* **738**, 74 (2011).
33. Дриммель, Шпергель (R. Drimmel and D.N. Spergel), *Astrophys. J.* **556**, 181 (2001).
34. Дриммель и др. (R. Drimmel, A. Cabrera-Lavers, and M. López-Corredoira), *Astron. Astrophys.* **409**, 205 (2003).
35. Дэйм и др. (T.M. Dame, Dap Hartmann, and P. Thaddeus), *Astrophys. J.* **547**, 792 (2001).
36. Карделли и др. (J.A. Cardelli, G.C. Clayton, and J.S. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
37. Кирк и др. (J.M. Kirk, D. Ward-Thompson, J. Di Francesco, T.L. Bourke, N.J. Evans II, B. Merín, L.E. Allen, L.A. Cieza, M.M. Dunham, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **185**, 198 (2009).
38. 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.), *arXiv:2206.06278* (2022).
39. Ковтюх и др. (V.V. Kovtyukh, C. Soubiran, R.E. Luck, D.G. Turner, S.I. Belik, S.M. Andrievsky, and F.A. Cherkonadskikh), *MNRAS* **389**, 1336 (2008).
40. Кох, МакВильям (A. Koch and A. McWilliam), *Astron. Astrophys.* **565**, A23 (2014).
41. Кун и др. (M. Kun, Z.T. Kiss, and Z. Balog), *Handbook of Star Forming Regions Vol. I: The Northern Sky Astronomical Society of the Pacific Monograph Publications*, V. 4., Ed. Bo Reipurth, 136 (2008).
42. Лазовик, Расторгуев (Y.A. Lazovik and A.S. Rastorguev), *Astron. J.* **160**, 136 (2020).
43. Лаллемент и др. (R. Lallement, C. Babusiaux, J.L. Vergely, D. Katz, F. Arenou, B. Valette, C. Hottier, and L. Capitano), *Astron. Astrophys.* **625**, A135 (2019).
44. Майснер, Финкбайнер (A.M. Meisner and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **798**, 88 (2015).
45. 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).
46. Ниу и др. (H. Niu, J. Wang, and J. Fu), *Astrophys. J.* **903**, 93 (2020).

47. Ортолани, Граттон (S. Ortolani and R. Gratton), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **82**, 71 (1990).
48. Паренаго П.П., *Курс звездной астрономии* (М.: ГИТТЛ, 1954).
49. Перриман (M. Perryman), *Astronomical Applications of Astrometry: Ten Years of Exploitation of the Hipparcos Satellite Data* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2009).
50. 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).
51. Спилкер и др. (A. Spilker, J. Kainulainen, and J. Orkisz), *Astron. Astrophys.* **653**, 63 (2021).
52. Хамрен и др. (K.M. Hamren, G.H. Smith, P. Guhathakurta, A.E. Dolphin, D.R. Weisz, A. Rajan, and C.J. Grillmair), *Astron. J.* **146**, 116 (2013).
53. Хамрик и др. (P. Hamrick, A. Banskal, and K. Tock), *Journal of the American Association of Variable Star Observers* **49**, 192 (2021).
54. Харрис (W.E. Harris), *Astron. J.* **112**, 1487 (1996).
55. Хе и др. (Z.-H. He, Y. Xu, C.-J. Hao, Z.-Y. Wu, and J.-J. Li), *Research in Astronomy and Astrophysics* **21**, (93).
56. 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).
57. Чекай и др. (M.A. Czekaj, A.C. Robin, F. Figueras, X. Luri, and M. Haywood), *Astron. Astrophys.* **564**, 102 (2014).
58. Чен и др. (B.-Q. Chen, G.-X. Li, H.-B. Yuan, Y. Huang, Z.-J. Tian, H.-F. Wang, H.-W. Zhang, C. Wang, and X.-W. Liu), *MNRAS* **493**, 351 (2020).
59. Чилингарян, Золотухин (I.V. Chilingarian and I.Yu. Zolotukhin), *MNRAS* **419**, 1727 (2012).
60. Чилингарян и др. (I.V. Chilingarian, I.Yu. Zolotukhin, I.Yu. Katkov, A.-L. Melchior, E.V. Rubtsov, and K.A. Grishin), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **228**, 14 (2017).
61. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkbeiner, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).