

МЕЖЗВЕЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЦИРРУСАХ В SDSS STRIPE 82

© 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}, З. Шекспир²

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 29.04.2022 г.

После доработки 11.08.2022 г.; принята к публикации 14.09.2022 г.

Применен метод подсчета звезд с помощью диаграмм Вольфа для определения межзвездного поглощения в пяти галактических циррусах полосы Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Stripe 82. Для этого мы использовали фотометрию звезд в фильтре GALEX NUV, а также фотометрию красных карликов в пяти полосах SDSS и четырех полосах SkyMapper Southern Sky Survey DR2. Циррусы выделены нами как области неба с повышенной инфракрасной эмиссией по карте Schlegel+1998. Поглощение в них вычислено относительно расположенных рядом областей сравнения с пониженной эмиссией. Результаты для разных фильтров хорошо согласуются, давая для каждого цирруса диапазон расстояний и закон поглощения. Найденные расстояния в диапазоне 140–415 пк согласуются с трехмерными картами покраснения. В диапазоне между фильтрами B и V найденные поглощения согласуются с оценками из Schlegel+1998 при законе поглощения Cardelli+1989 с $R_V = 3.1$. Однако найденные поглощения для всех фильтров лучше всего описываются не законом поглощения Cardelli+1989 с каким-либо R_V , а обратной пропорциональностью поглощения и длины волны со своим коэффициентом для каждого цирруса. В одном из циррусов наши результаты предполагают очень слабое уменьшение поглощения с длиной волны, т.е. большой вклад серого поглощения. В остальных циррусах также не исключено проявление серого поглощения. Это согласуется с прежними измерениями закона поглощения вдали от основной плоскости Галактики.

Ключевые слова: диаграмма Герцшпрунга–Рассела, галактические окрестности Солнца, межзвездная среда, межзвездные пылевые облака.

DOI: 10.31857/S0320010822090030

ВВЕДЕНИЕ

Сто лет назад Вольф (1923) предложил метод определения межзвездного поглощения в пылевых облаках по фотометрии выборок звезд, полных до некоторой звездной величины. Описание этих так называемых диаграмм Вольфа дано, например, Паренаго (1954, с. 248–249) и Куликовским (1985, с. 147–149), а среди недавних исследований — Сзомору, Гухатакурта (1999) и Горбиковым, Брошем (2010). Поглощение в облаке определяется по отношению к заведомо малому поглощению в области сравнения вне облака. Поглощение делает

звезды внутри или за облаком более тусклыми по сравнению со звездами перед облаком или в области сравнения. Из-за этого кумулятивное (ярче заданной звездной величины) число звезд одного или нескольких близких классов внутри и за облаком меньше, чем в области сравнения.

При сопоставлении этих подсчетов звезд надо учитывать систематические различия в числе звезд одного класса для облака и для области сравнения, например, при их разном удалении от основной плоскости Галактики. Эта проблема решается либо введением поправок за разницу в положении облака и области сравнения на основе какой-либо надежной модели Галактики, либо рассмотрением облаков, близких к Солнцу, т.е. в

*Электронный адрес: georgegontcharov@yahoo.com

пределах нескольких сотен парсек. Кроме того, при сравнении подсчетов звезд надо учитывать неизбежные случайные флуктуации плотности распределения звезд и их характеристик. Эта проблема решается использованием большого числа (многих тысяч) звезд. Следовательно, для успешного применения диаграмм Вольфа приходится использовать очень глубокие фотометрические обзоры со звездами наиболее распространенных классов, с максимальной пространственной плотностью распределения. В XX в. применение диаграмм Вольфа было затруднено как раз из-за отсутствия глубоких обзоров и надежных моделей Галактики, а также из-за трудностей в выделении звезд одного класса из наблюдаемой смеси звезд.

Отметим, что диаграммы Вольфа обычно не применимы к очень плотным облакам пыли из-за того, что в таких облаках велики градиенты характеристик среды. В такой ситуации теряют смысл средние характеристики облака, которые получаются из диаграмм Вольфа.

Преимущества диаграмм Вольфа по сравнению с другими методами определения поглощения видятся в следующем.

1. Используемая выборка звезд может быть смесью разных классов, лишь бы один класс был доминирующим.
2. Может использоваться фотометрия низкой точности и только в одном фильтре. Точность результата, как правило, определяется не точностью фотометрии, а распределением выборки по абсолютной звездной величине.
3. Результатом является именно межзвездное поглощение, а не покраснение, как во многих других методах. При использовании фотометрии в нескольких фильтрах это позволяет определить поглощение в каждом из них, а следовательно, закон поглощения, т.е. зависимость поглощения от длины волны. Таким образом, диаграммы Вольфа — один из немногих методов, обнаруживающих серое или почти серое поглощение, т.е. не зависящее или мало зависящее от длины волны.
4. При использовании качественных данных поглощение определяется по диаграммам Вольфа со сравнительно высокой точностью — порядка 0.01 звездной величины. Но сопутствующим недостатком является примерно одинаковая точность для всех фильтров при использовании одной и той же выборки звезд. Учитывая, что поглощение в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне гораздо больше, чем в видимом и тем более в инфракрасном (ИК) диапазоне, одинаковая

точность определения поглощения ведет к падению относительной точности с увеличением длины волны излучения. Это значит, что диаграммы Вольфа бесполезны для ИК-фотометрии: для не слишком плотных облаков найденное малое поглощение имеет очень низкую относительную точность, а для плотных облаков их неоднородная структура делает найденное среднее по облаку поглощение бессмысленным.

5. Диаграммы Вольфа позволяют определить не только поглощение, но и расстояние до облака, если известно распределение используемых звезд по абсолютной звездной величине (функция светимости).

Недавнее появление глубоких фотометрических обзоров неба с помощью ПЗС-матриц позволяет возродить применение диаграмм Вольфа. Фактически их первое успешное применение на новом уровне представлено Сзомору, Гухатакурта (1999), которые также дали содержательный обзор терминов и истории этого раздела астрономии.

В настоящем исследовании мы рассматриваем диаграммы Вольфа для пылевых облаков Stripe 82, в которой есть глубокая фотометрия во многих фильтрах. Узкая полоса небесной сферы Stripe 82 вдоль небесного экватора шириной $-1.25^\circ < \delta < 1.25^\circ$, длиной $-50^\circ < \alpha < +60^\circ$ и площадью около 275 квадратных градусов известна прежде всего ее интенсивными фотометрическими наблюдениями в фильтрах *uSDSS*, *gSDSS*, *rSDSS*, *iSDSS*, *zSDSS* обзора неба Sloan Digital Sky Survey (SDSS; Флири, Трухильо, 2016). Перспективы и преимущества исследования облаков в высоких галактических широтах методом диаграмм Вольфа с использованием фотометрии SDSS описаны Сзомору, Гухатакурта (1999).

Кроме фотометрии SDSS нами использована достаточно глубокая фотометрия объектов Stripe 82 в фильтре NUV (ближний ультрафиолет) обзора, выполненного телескопом Galaxy Evolution Explorer¹ (GALEX; Мартин и др. 2005) и представленного Бьянки и др. (2017, а также в фильтрах *gSMSS*, *rSMSS*, *iSMSS*, *zSMSS* обзора неба SkyMapper Southern Sky Survey DR2² (SMSS; Онкен и др., 2019).

Stripe 82 пересекает средние и высокие галактические широты ($-64^\circ < b < -24^\circ$), что предполагает сравнительно малое поглощение. Stripe 82

¹<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/II/335>

²<https://skymapper.anu.edu.au>

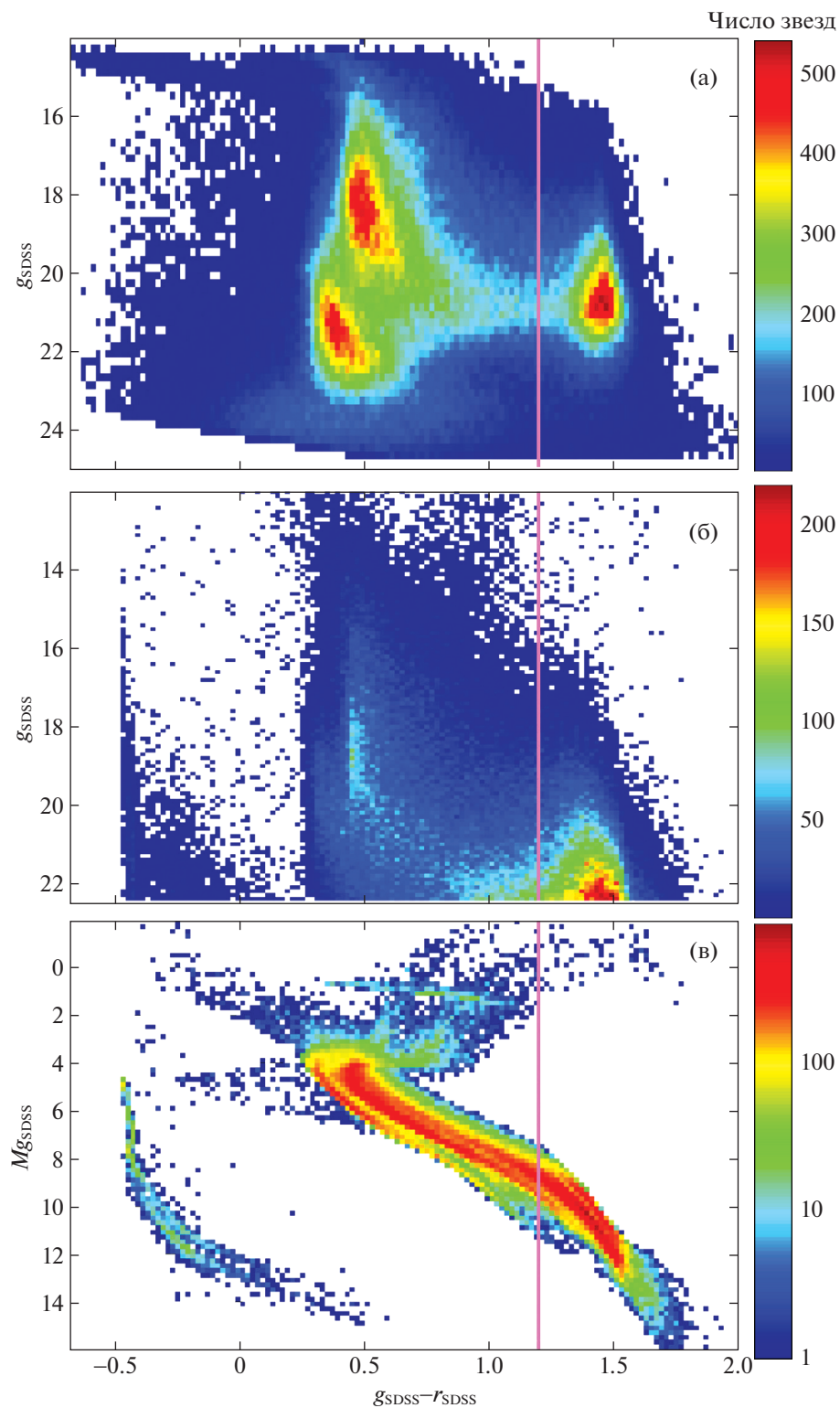


Рис. 1. (а) — Диаграмма $(g_{\text{SDSS}} - r_{\text{SDSS}}) - g_{\text{SDSS}}$ для выборки звезд Флири, Трухильо (2016) в циркусе 1 полосы Stripe 82, (б) — то же по модели звездного населения TRILEGAL, (в) — соответствующая диаграмма Герцшпрунга–Рассела $(g_{\text{SDSS}} - r_{\text{SDSS}}) - M_{g_{\text{SDSS}}}$ по TRILEGAL. Вертикальная прямая отделяет использованные нами красные карлики с $g_{\text{SDSS}} - r_{\text{SDSS}} > 1.2$.

содержит волокнистые пылевые облака малой оптической толщины, т.е. оптические и ИК высокоширотные галактические циррусы (Сзомору, Гухатакурта, 1999; Марчук и др., 2021, и ссылки в этих работах). Наша статья посвящена оценке поглощения, расстояния и закона поглощения с помощью диаграмм Вольфа для нескольких галактических циррусов в Stripe 82 с использованием фотометрии SDSS, SMSS и GALEX.

ДАННЫЕ

В данных SDSS³ нами оставлены только звезды, но не галактики (в данных Флири, Трухильо (2016) параметр разделения на звезды и галактики $S/G = 1$, а эксцентриситет изображения объекта $Ellipticity \leq 0.4$ говорит о том, что изображение не слишком вытянутое) с хорошим качеством изображения ($Flags \leq 10$). Также мы ограничили точность фотометрии: выше 0.4 звездной величины в фильтре u_{SDSS} и 0.25 звездной величины в фильтрах g_{SDSS} , r_{SDSS} и i_{SDSS} . Отметим, что для не слишком слабых звезд фотометрия SDSS сравнительно точна: например, эти ограничения на точность фотометрии исключают менее 1% звезд с $g_{SDSS} < 24$.

Распределение отобранных звезд на диаграмме цвет–величина $(g_{SDSS} - r_{SDSS}) - g_{SDSS}$ в части полосы Stripe 82 (циррусе 1, обсуждаемом далее) показано на рис. 1а. В других частях полосы Stripe 82 это распределение аналогично. На рис. 1а видны три области повышенной плотности распределения звезд на диаграмме цвет–величина, что говорит о преобладании в выборке трех классов звезд.

Характеристики этих классов определены нами из моделирования звездного населения рассматриваемых областей неба с помощью модели TRILEGAL⁴ (Жирарди и др., 2005) с учетом модели строения и эволюции звезд PARSEC⁵ (Брессан и др., 2012). Для сравнения с наблюдаемой диаграммой на рис. 1б показана модельная диаграмма цвет–величина, а на рис. 1в — соответствующая модельная диаграмма Герцшпрунга–Рассела (ГР) для цирруса 1 при ограничении $g_{SDSS} < 22.5$, которое близко к фактическому ограничению на рис. 1а. При этом нами приняты параметры TRILEGAL по умолчанию, но с более реалистичными оценками поглощения для циррусов и областей сравнения. Видно, что среди звезд преобладают карлики трех классов:

- карлики класса G с примерно солнечной металличностью, находящиеся около точки поворота Главной последовательности (ГП) и относящиеся к тонкому диску, формируют сгущение сравнительно ярких и горячих звезд на диаграмме цвет–величина на рис. 1а и 1б при $g_{SDSS} - r_{SDSS} \approx 0.55$ и $g_{SDSS} \approx 18$;
- субкарлики класса G с низкой металличностью, также находящиеся около точки поворота ГП, но относящиеся к толстому диску, формируют на диаграмме ГР вторую ГП ниже и левее основной, а на диаграмме цвет–величина — сгущение сравнительно тусклых и горячих звезд при $g_{SDSS} - r_{SDSS} \approx 0.4$ и $g_{SDSS} \approx 21.5$ на рис. 1а и 1б, причем на графике (б) это сгущение едва заметно, так как, видимо, TRILEGAL недооценивает число субкарликов толстого диска в направлении цирруса 1;
- красные карлики класса M с различной металличностью преимущественно в диапазоне $M/H = -0.25 \pm 0.30$ формируют сгущение холодных звезд на диаграмме цвет–величина на рис. 1а и 1б.

Карликов и субкарликов класса K на на рис. 1а и 1б гораздо меньше потому, что они сильно уступают классу M в количестве, а классу G в светимости.

Отметим, что результаты моделирования TRILEGAL и, соответственно, диаграммы цвет–величина и ГР заметно варьируются в зависимости от принятой начальной функции масс и параметров учета двойных звезд. Но в любом случае TRILEGAL показывает преобладание отмеченных нами трех классов карликов.

Как отмечено ранее, использование звезд только одного класса повышает точность диаграмм Вольфа. Поэтому мы решили использовать только красные карлики класса M, отобранные с помощью ограничения $g_{SDSS} - r_{SDSS} > 1.2$, как показано на рис. 1. Разумное варьирование этого критерия отбора меняет состав выборки меньше, чем на 2%, т.е. незначительно. Использование красных карликов кроме прочих преимуществ должно резко сократить в выборке примесь неоттождествленных галактик, так как подавляющее большинство наблюдаемых в проекте SDSS галактик при малом красном смещении гораздо голубее красных карликов, а при большом красном смещении гораздо слабее звезд нашей выборки, как показано Стратевой и др. (2001) и Флири, Трухильо (2016).

Для определения медианных характеристик используемой выборки красных карликов, отметим, что на рис. 1 максимум их распределения по

³<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/MNRAS/456/1359>

⁴<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/trilegal>

⁵http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd_3.6

цвету приходится на наблюдаемый цвет $g_{SDSS} - r_{SDSS} \approx 1.48$. Для этой области неба популярная карта покраснения Шлегеля и др. (1998, далее — SFD98) дает $E(B - V) \approx 0.1$, т.е. $E(g_{SDSS} - r_{SDSS}) \approx 0.1$ при использовании наиболее популярного закона поглощения Карделли и др. (1989, далее — CCM89) с соотношением поглощения и покраснения $R_V \equiv A_V/E(B - V) = 3.1$. Тогда медиана нормального цвета используемых красных карликов $(g_{SDSS} - r_{SDSS})_0 \approx 1.38$, соответствующая медиана массы — около $0.48 M_\odot$, медиана абсолютной звездной величины $M_{g_{SDSS}} \approx 10.7$ и медиана металличности $[M/H] = -0.2$ в соответствии с TRILEGAL и PARSEC.

Оценим, как далеко могут находиться галактические циррусы, которые можно исследовать с помощью рассматриваемой выборки красных карликов. Флири, Трухильо (2016) показали, что их разделение наблюдаемых объектов на звезды и галактики надежно при $g_{SDSS} < 23$. Поэтому более слабые объекты мы использовали только для контроля результатов. Из рис. 1 видно, что число красных карликов уменьшается при $g_{SDSS} > 21.5$. Однако это уменьшение вызвано не столько неполнотой выборки, сколько существенным уменьшением пространственной плотности распределения красных карликов с удалением от плоскости Галактики, так как рассматриваются высокие галактические широты. Поскольку подавляющее большинство используемых нами красных карликов имеют $M_{g_{SDSS}} < 13$ и поглощение $A_{g_{SDSS}} < 0.5$ (что следует из TRILEGAL, PARSEC и результатов нашего исследования), полноты выборки до $g_{SDSS} < 23$ достаточно для анализа облаков на расстоянии до $R = 10^{(23+5-13-0.5)/5} \approx 800$ пк от Солнца. Эта оценка подтверждается моделированием с TRILEGAL. Наиболее надежные оценки расстояний до рассматриваемых циррусов в Stripe 82 дают трехмерные карты покраснения Гончарова (2017а, далее — G17)⁶, Грина и др. (2019, далее — GSZ19)⁷ и Лаллемент и др. (2022, далее — LVB22)⁸. Первая карта предполагает рассматриваемые циррусы на расстоянии 100–320 пк, вторая — 140–380 пк, третья — 120–380 пк от Солнца. Таким образом, столь близкие к нам галактические циррусы вполне можно анализировать с помощью рассматриваемой выборки красных карликов.

В данных SMSS нами оставлены объекты с качественной фотометрией (все Flags = 0). Как

из SDSS, мы отобрали из SMSS только красные карлики и существенно уменьшили примесь галактик с помощью ограничения $g_{SMSS} - r_{SMSS} > 0.7^9$. Фотометрия SMSS имеет высокую точность. Нами исключено всего лишь около 0.01% красных карликов, которые демонстрируют точность фотометрии хуже 0.3 звездной величины хотя бы в одном из фильтров SMSS.

Для исключения галактик в данных GALEX нами оставлены только объекты, с вероятностью $> 50\%$, являющиеся звездами и при этом отмеченные как ‘not extended object’ (не расширен). Отметим, что эти ограничения исключают только 3% объектов с фотометрией GALEX NUV в полосе Stripe 82 и не влияют на результаты. В то же время мы не ограничили данные по точности фотометрии GALEX NUV. Эта точность довольно низка: ее медиана составляет 0.4 звездной величины. Но, как отмечено ранее, точность получаемого поглощения определяется не точностью фотометрии, а стандартным отклонением абсолютной звездной величины рассматриваемых звезд, которое больше одной звездной величины, согласно PARSEC и TRILEGAL. Звезды с фотометрией GALEX NUV ярки в УФ-диапазоне и включают звезды OB, голубые субкарлики, гиганты горизонтальной ветви с низкой металличностью и другие классы. Согласно PARSEC и TRILEGAL, все они покрывают примерно один и тот же диапазон абсолютных величин. Поэтому мы не выделяли из объектов GALEX какой-либо класс звезд. Это, а также меньшее число звезд с фотометрией GALEX NUV, чем с фотометрией в оптических фильтрах SDSS и SMSS, привело к несколько худшей точности определения поглощения в фильтре GALEX NUV, как видно из табл. 1 с нашими результатами.

Для применения диаграмм Вольфа области неба с предполагаемым повышенным поглощением должны быть отделены от областей сравнения с пониженным поглощением. Для такого разделения мы использовали оценки покраснения $E(B - V)$ вдоль лучей зрения до бесконечности из SFD98. Такой подход при выделении облака и области сравнения для анализа диаграмм Вольфа ранее применен, например, Сзомору, Гухатакурта (1999). Оценки покраснения получены в SFD98 путем калибровки оценок эмиссии пыли в далеком ИК диапазоне по цвету эллиптических галактик. В свою очередь, эти оценки эмиссии получены космическими телескопами Cosmic Background Explorer (COBE) и Infrared Astronomical Satellite (IRAS). Отметим, что оценки покраснения в

⁶<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/PAZh/43/521>

⁷<http://argonaut.skymaps.info/>

⁸<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/A+A/661/A147>

⁹Это дает качественно то же разделение, что критерий $g_{SDSS} - r_{SDSS} > 1.2$. Различие в числах вызвано разницей фильтров g_{SDSS} и g_{SMSS} .

Таблица 1. Найденная разность поглощения ΔA в циррусе и в области сравнения для различных циррусов и фотометрических фильтров

Фильтр	λ_{eff}	Циррус 1	Циррус 2	Циррус 3	Циррус 4	Циррус 5
GALEX NUV	231	0.232 ± 0.04	0.401 ± 0.04	0.098 ± 0.04	0.194 ± 0.04	0.298 ± 0.04
u_{SDSS}	353	0.197 ± 0.03	0.196 ± 0.03	0.094 ± 0.03	0.119 ± 0.03	0.207 ± 0.03
g_{SDSS}	475	0.194 ± 0.03	0.260 ± 0.03	0.082 ± 0.03	0.059 ± 0.03	0.173 ± 0.03
r_{SDSS}	622	0.165 ± 0.03	0.207 ± 0.03	0.058 ± 0.03	0.029 ± 0.03	0.129 ± 0.03
i_{SDSS}	763	0.197 ± 0.03	0.149 ± 0.03	0.050 ± 0.03	0.033 ± 0.03	0.125 ± 0.03
z_{SDSS}	905	0.192 ± 0.03	0.100 ± 0.03	0.053 ± 0.03	0.019 ± 0.03	0.119 ± 0.03
g_{SMSS}	514	0.175 ± 0.03	0.193 ± 0.03	0.096 ± 0.03	0.038 ± 0.03	0.129 ± 0.03
r_{SMSS}	615	0.177 ± 0.03	0.144 ± 0.03	0.072 ± 0.03	0.044 ± 0.03	0.116 ± 0.03
i_{SMSS}	776	0.169 ± 0.03	0.143 ± 0.03	0.089 ± 0.03	0.041 ± 0.03	0.110 ± 0.03
z_{SMSS}	913	0.188 ± 0.03	0.096 ± 0.03	0.084 ± 0.03	0.050 ± 0.03	0.075 ± 0.03

Примечание. λ_{eff} — эффективная длина волны фильтра в нанометрах.

Stripe 82 на основе других исследований очень близки к оценкам SFD98. Например, оценки покраснения по наблюдениям космического телескопа Planck (2014), откалиброванные Майснером, Финкбайнером (2015) по цвету звезд SDSS, фактически совпадают с оценками SFD98: их коэффициент корреляции составляет 0.97.

На рис. 2 показаны вариации покраснения $E(B - V)$ в рассматриваемой нами части полосы Stripe 82 с $-50^\circ < \alpha < +50^\circ$. Мы не рассматриваем небольшую часть Stripe 82 с $+50^\circ < \alpha < +60^\circ$, т.к. по всем оценкам поглощение в ней слишком велико ($A_V > 1$) для получения точных результатов с помощью диаграмм Вольфа. Отметим, что пикселизация на рис. 2 отражает угловое разрешение 6.1 угл. мин для карты SFD98.

В табл. 2 даны примерные галактические координаты центров рассматриваемых циррусов, их площади и другие характеристики. В качестве циррусов мы рассматриваем обособленные области неба с покраснением выше предела $E(B - V)_{\text{cirrus}}$, указанного в табл. 2. Для каждого цирруса этот предел свой. Пять рассматриваемых циррусов показаны в нижней половине рис. 2. Аналогично в качестве областей сравнения мы рассматриваем

окрестности циррусов с покраснением ниже предела $E(B - V)_{\text{bg}}$, указанного в табл. 2. Области сравнения разных циррусов могут пересекаться. Важной характеристикой каждого цирруса или области сравнения является медиана покраснения, указанная в табл. 2. Разность медиан покраснений для цирруса и его области сравнения $\Delta E(B - V)$ рассматривается нами как оценка покраснения собственно внутри цирруса. Для результативности исследования, $\Delta E(B - V)$ должна быть достаточно велика, а следовательно, кроме циррусов и областей сравнения в Stripe 82 есть обширные области, не отнесенные нами ни к тем, ни к другим. Кроме того, предельные значения $E(B - V)_{\text{cirrus}}$ и $E(B - V)_{\text{bg}}$ подбираются так, чтобы площади цирруса и области сравнения были в точности равны и достаточно велики для применимости диаграмм Вольфа.

Для каждого цирруса полученные нами оценки поглощения в нем можно сравнить с оценкой поглощения $\Delta A_{V \text{ SFD98}}$ из табл. 2, которая вычислена на основе $\Delta E(B - V)$ по данным SFD98. Не стоит ожидать полного совпадения наших оценок поглощения с оценками из SFD98, т.к. методы их получения и исходные данные совершенно различ-

Таблица 2. Характеристики рассматриваемых циррусов

Характеристика	Циррус 1	Циррус 2	Циррус 3	Циррус 4	Циррус 5
l	49°	63°	101°	133°	178°
b	-28°	-45°	-62°	-63°	-48°
Площадь	13.9 [□]	18.2 [□]	8.7 [□]	9.5 [□]	18.2 [□]
$E(B - V)_{\text{cirrus}}$	>0.088	>0.085	>0.035	>0.035	>0.060
Медиана $E(B - V)_{\text{cirrus}}$	0.100	0.103	0.039	0.040	0.081
$E(B - V)_{\text{bg}}$	<0.064	<0.050	<0.021	<0.021	<0.032
Медиана $E(B - V)_{\text{bg}}$	0.052	0.046	0.019	0.020	0.028
$\Delta E(B - V)$	0.048	0.057	0.020	0.020	0.053
$\Delta A_{V \text{ SFD98}}$	0.148	0.176	0.062	0.062	0.163

Примечание. Примерные галактические координаты l и b центров рассматриваемых циррусов, принятая нами площадь цирруса в квадратных градусах, принятое ограничение на покраснение SFD98 для цирруса $E(B - V)_{\text{cirrus}}$, медиана покраснения SFD98 для цирруса, принятое ограничение на покраснение SFD98 для области сравнения $E(B - V)_{\text{bg}}$, медиана покраснения SFD98 для области сравнения, разность медиан покраснений $\Delta E(B - V)$ в циррусе и в соответствующей области сравнения, оценка поглощения $\Delta A_{V \text{ SFD98}}$ в циррусе на основе $\Delta E(B - V)$ и закона поглощения CCM89 с $R_V = 3.1$.

ны. Кроме того, оценки SFD98 совершенно не учитывают возможные значительные вариации закона поглощения в высоких широтах, обнаруженные Горбиковым, Брошем (2010), Гончаровым (2012) и другими авторами, в то время, как диаграммы Вольфа способны показать такие вариации. Более того, как заявлено самими авторами SFD98 и показано многими дальнейшими исследованиями, оценки $E(B - V)$ из SFD98 содержат существенные случайные и систематические ошибки (см. обзор Гончарова, 2016б, и обсуждение Гончарова, Мосенкова, 2017, 2018, 2021). Например, декларированная авторами SFD98 неопределенность калибровки ‘ИК-эмиссия — покраснение’ составляет $\sigma(E(B - V)) = 0.028$. С другой стороны, существенны и ошибки найденных нами поглощений. Поэтому сравнение наших результатов с SFD98, представленное в разделе ‘Результаты’, весьма интересно.

В табл. 2 показано, что ради достаточно большого числа звезд в циррусах и областях сравнения мы вынуждены увеличивать их площадь и, следовательно, включать в них области со сравнительно малым и большим покраснением соответственно. В результате медианы $E(B - V)_{\text{bg}}$ довольно велики,

особенно в циррусах 1 и 2. Циррусы 3 и 4 имеют наименьшие $\Delta E(B - V)$ (т.е. не сильно отличаются от фона) и наименьшую площадь. Это делает результаты для них наименее надежными.

Полоса Stripe 82 слишком узка для того, чтобы полностью вместить циррусы, пересекающие ее. Но полностью они отчетливо видны на карте SFD98. Она показывает, что, хотя циррусы 1, 2 и 5 внутри Stripe 82 можно разделить на отдельные волокна, за пределами Stripe 82 волокна, отнесенные нами к одному циррусу, действительно соединяются. Для обоснования рассмотрения циррусов 1, 2 и 5 как единых объектов мы вычислили поглощения и расстояния с помощью диаграмм Вольфа не только для единых циррусов, но и для их частей, визуально различимых на рис. 2, и получили результаты, совпадающие друг с другом в пределах их неопределенностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Типичная диаграмма Вольфа для цирруса 1 и фильтра g_{SDSS} показана на рис. 3. Для нее использовано несколько десятков тысяч красных

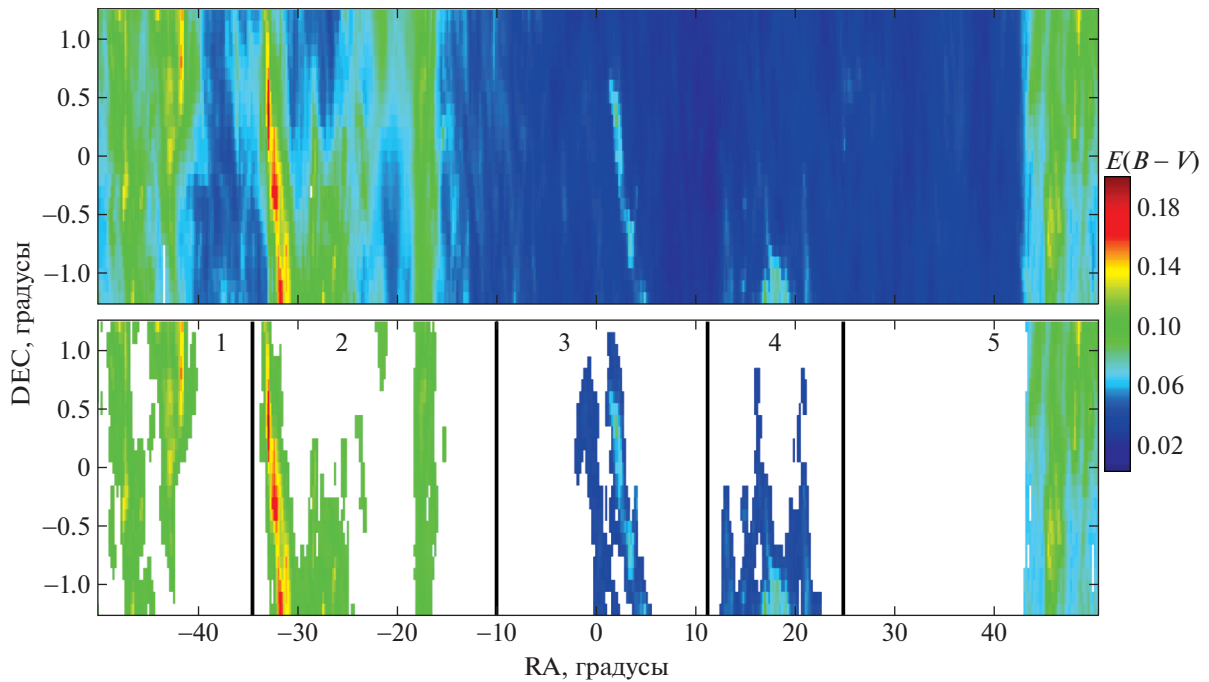


Рис. 2. Вверху: покраснение $E(B - V)$ по данным карты SFD98 в рассматриваемой части полосы Stripe 82. Внизу: области Stripe 82, отнесенные к рассматриваемым циррусам, обозначены цветом и номерами. Вертикальные линии примерно разграничивают области неба, включающие циррус, его область сравнения и область, не относящуюся ни к циррусу, ни к области сравнения.

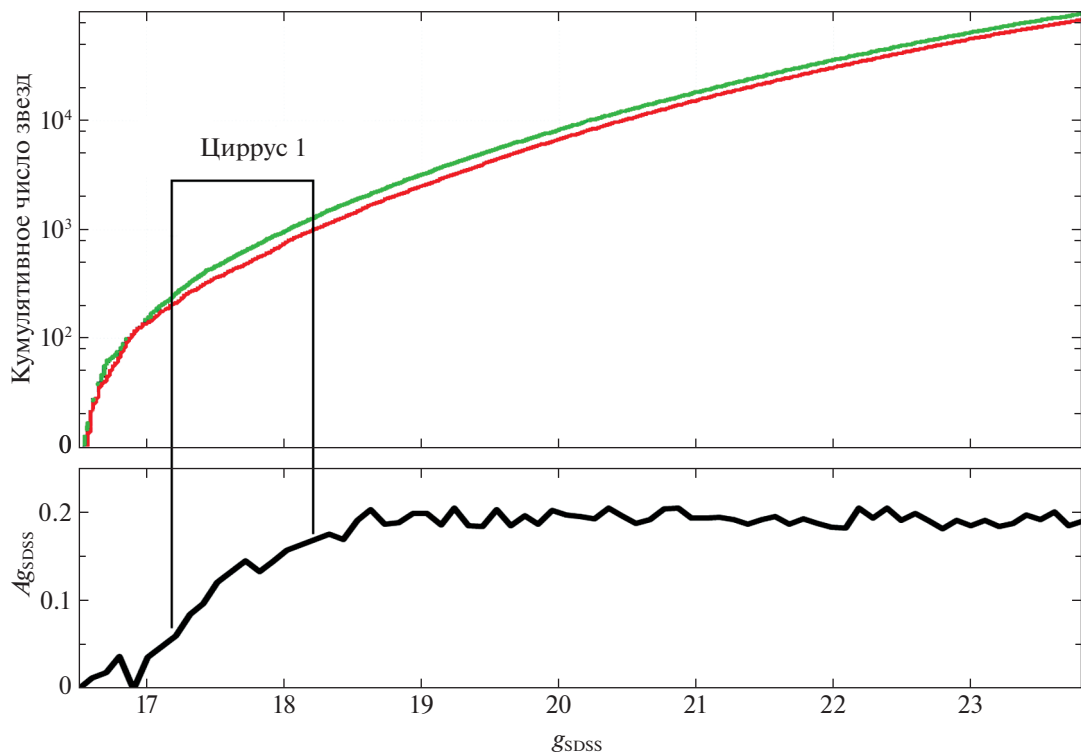


Рис. 3. Диаграмма Вольфа для цирруса 1 и фильтра g_{SDSS} . Вверху: кумулятивное число красных карликов в зависимости от g_{SDSS} в областях с малой и большой ИК-эмиссией пыли — верхняя (зеленая) и нижняя (красная) кривая соответственно. Внизу: разность между этими кривыми вдоль оси абсцисс есть поглощение $A_{g_{SDSS}}$ в зависимости от g_{SDSS} . Диапазон значительного роста $A_{g_{SDSS}}$ отмечен как циррус 1.

карликов. Измеренное поглощение $A_{g_{SDSS}}$ соответствует расстоянию вдоль оси абсцисс между кумулятивным числом красных карликов в области сравнения и в соответствующем циррусе, т.е. между цветными кривыми. Поглощение $A_{g_{SDSS}}$ представлено на нижнем графике рис. 3. Видно, что это поглощение нарастает в диапазоне величин $17.2 < g_{SDSS} < 18.2$, а затем стабилизируется на уровне $A_{g_{SDSS}} = 0.194$. Этот диапазон величин соответствует диапазону расстояний $186 < R < 270$ пк для цирруса 1, если принять медианную абсолютную величину $M_{g_{SDSS}} = 10.7$ используемых красных карликов, фоновое поглощение перед циррусом $A_{g_{SDSS}} \approx 0.15$ (судя по данным о покраснении в области сравнения) и добавленное к нему поглощение внутри цирруса, которое растет от 0 до $\Delta A_{g_{SDSS}} = 0.194$.

Поглощения, найденные по всем циррусам и фильтрам, представлены в табл. 1. Подчеркнем, что это — оценки поглощений в самих циррусах, не включающие в себя дополнительное фоновое поглощение в областях сравнения, которое стоит прибавить к поглощению, указанному в табл. 1, если необходимо оценить полное поглощение сквозь всю пыль в направлении этих циррусов. Неопределенности поглощений оценены, исходя из числа используемых звезд, их распределения по абсолютной величине на основе PARSEC и TRILEGAL, флуктуаций этого распределения, точности фотометрии и неопределенности в разности положений цирруса и области сравнения в пространстве. Последняя неопределенность весьма существенна (не меньше ± 0.02 звездной величины) из-за соответствующей неопределенности расстояний до циррусов и областей сравнения, хотя очевидная близость рассматриваемых циррусов к Солнцу делает эту неопределенность приемлемой. Полученные результаты надежны с точки зрения статистики, так как в каждой рассматриваемой области (циррус или область сравнения) использованы многие тысячи звезд.

Для контроля полученных результатов мы сравнили для каждого цирруса покраснение $E(g_{SDSS} - r_{SMSS}) = A_{g_{SDSS}} - A_{r_{SDSS}}$, вычисленное по табл. 1, с таким же покраснением, найденным совершенно другим методом: как разница в модах распределения красных карликов по цвету $g_{SDSS} - r_{SMSS}$ в циррусе и области сравнения. Неопределенности покраснений в обоих методах примерно равны. Покраснения, полученные этими двумя методами, согласуются в пределах неопределенностей.

В табл. 3 для каждого цирруса даны четыре оценки диапазона расстояний, в котором располагается циррус, найденные в нашем исследова-

нии (среднее по всем фильтрам) и по картам покраснения G17, GSZ19 и LVB22. Указанные в табл. 3 диапазоны включают и неопределенности этих диапазонов. В этих неопределенностях доминирует неопределенность распределения используемых звезд по абсолютной величине.

Из табл. 3 видно, что все четыре оценки расстояний существенно пересекаются только для циррусов 2 и 5, т.е. самых крупных и с наибольшим поглощением. Видимо, неопределенность расстояний до остальных циррусов вызвана как раз их меньшим размером и поглощением. Диапазон пересечения оценок расстояний R^* можно рассматривать как наиболее вероятную оценку расстояния до центра соответствующего цирруса. Этот диапазон указан в нижней строке табл. 3. Для цирруса 4 пересечение диапазонов для всех четырех оценок отсутствует, но мы указали для него пересечение диапазонов без учета оценки из LVB22, которая сильно отличается от остальных. Отметим, что для цирруса 4 нами обнаружен небольшой рост поглощения при $R > 500$ пк. Возможно, циррус 4 является проекцией на небесную сферу двух циррусов на разных расстояниях от Солнца. Для столь высокоширотного цирруса это означает существование пыли на удалении $|Z| > 445$ пк от основной плоскости Галактики. Этот рост поглощения может быть и результатом некой ошибки из-за того, что только малая часть цирруса 4 оказалась внутри Stripe 82.

Для того чтобы определить наблюдаемый закон поглощения в каждом циррусе, оценки поглощения из табл. 1 представлены черными ромбами на рис. 4 в зависимости от величины, обратной длине волны $1/\lambda_{\text{eff}}$ в микронах. Видно, что для всех циррусов линейная аппроксимация закона поглощения (со своим коэффициентом для каждого цирруса) лучше аппроксимации законом поглощения ССМ89 с любым R_V . Это особенно заметно для всех циррусов в фильтре NUV и для цирруса 1 в фильтрах z_{SDSS} и i_{SDSS} , где закон поглощения ССМ89 с любым R_V нельзя провести через найденные поглощения. С учетом неопределенностей наши результаты уверенно показывают очень слабый рост поглощения с величиной $1/\lambda_{\text{eff}}$ для цирруса 1 и не исключают сравнительно слабый рост для остальных циррусов. Это предполагает существенный вклад серого поглощения в полное поглощение.

Тем не менее для качественной оценки наблюдаемого закона поглощения в сравнении с ССМ89 с $R_V = 3.1$ мы вычислили оптимальный R_V и показали закон ССМ89 с ним красной кривой на рис. 4. Под оптимальным R_V мы подразумеваем такой, который наиболее близок к 3.1, но позволяет закону поглощения пройти через наши оценки

Таблица 3. Найденный диапазон расстояний до цирруса в сравнении с оценками по разным картам покраснения

Расстояние, пк	Циррус 1	Циррус 2	Циррус 3	Циррус 4	Циррус 5
R	150–310	195–415	150–270	170–300	140–340
R_{G17}	120–200	100–280	160–320	160–200	140–200
R_{GSZ19}	200–380	140–210	170–230	170–190	150–200
R_{LVB22}	120–260	180–340	230–380	270–360	130–210
R^*	200	195–210	230	170–190	150–200

Примечание. R — найденный диапазон расстояний до цирруса, R_{G17} , R_{GSZ19} и R_{LVB22} — оценки диапазона расстояний до цирруса по картам Гончарова (2017а), Грина и др. (2019) и Лаллемент и др. (2022), соответственно. В нижней строке указан диапазон R^* пересечения оценок. Для цирруса 4 R^* указан без учета оценки из LVB22.

поглощения для коротковолновых фильтров в пределах их неопределенностей и максимально близко к нашим оценкам для длинноволновых фильтров. Оптимальные коэффициенты $R_V = 6.9, 4.0, 5.1, 2.9$ и 3.7 для пяти циррусов соответственно. Так как эти числа не являются полноценными статистическими оценками, а закон поглощения с оптимальным R_V , очевидно, хуже линейной аппроксимации, мы не оценивали неопределенности этих оптимальных коэффициентов. Для всех циррусов, кроме четвертого, оптимальный $R_V > 3.1$. Это качественно согласуется с оценками по карте пространственных вариаций R_V , полученной Гончаровым (2012): $3.4 < R_V < 3.9$ для рассматриваемых циррусов, если принять для них расстояния из табл. 3. Но, согласно Гончарову (2012), в высоких широтах R_V существенно зависит от расстояния. И низкое значение оптимального R_V для цирруса 4 может объясняться найденным нами компонентом этого цирруса на большом удалении от Солнца, так как, согласно Гончарову (2012), $R_V < 3.1$ при $R > 500$ пк.

Слабый рост поглощения с величиной $1/\lambda_{\text{эф}}$, т.е. проявление серого поглощения, наряду со значительными пространственными вариациями закона поглощения, является типичным для пылевой среды вдали от основной плоскости Галактики (при удалении от нее $|Z| > 200$ пк), как показано Горбиковым, Брошем (2010), Давенпортом и др. (2014), Гончаровым (2012), Гончаровым (2013), Гончаровым (2016а) и в обзоре Гончарова (2017б).

Наши результаты для цирруса 2 стоит сравнить с результатами Сзомору, Гухатакурта (1999), которые исследовали с помощью диаграмм Вольфа другую часть этого цирруса (обозначена ими как

облако PV1), отстоящую на 2 градуса от полосы Stripe 82. Особого внимания заслуживает найденный ими для этой части цирруса наилучший закон поглощения ССМ89 с очень малым $R_V \approx 1.7$. Казалось бы, это противоречит найденному нами для цирруса 2 слабо нарастающему закону поглощения, близкому к ССМ89 с $R_V \approx 4$. Поэтому отметим различия в этих исследованиях. Часть цирруса 2, исследованная Сзомору, Гухатакурта (1999), имеет примерно вдвое большее поглощение A_V и поэтому может обладать иными свойствами, включая иной закон поглощения. Исследованная ими площадь примерно на порядок меньше площади, исследованной нами. Использованная ими фотометрия в полосах $UBVRI$ менее точна и менее глубока, чем использованная нами. В результате найденные ими поглощения имеют примерно втрое большие неопределенности, чем наши (см. их рис. 4 и 6). И вывод Сзомору, Гухатакурта (1999) о малой величине $R_V \approx 1.7$ недостаточно надежен: их результаты для разных фильтров фактически одинаково хорошо описываются законом ССМ89 с широким диапазоном $1.5 < R_V < 3.5$. Таким образом, сравнение наших результатов с Сзомору, Гухатакурта (1999) прежде всего показывает прогресс в этой области астрономии за 23 года.

Для сравнения с нашими результатами мы представили на рис. 4 оценки из SFD98 с учетом их неопределенностей, комбинированные с законом поглощения ССМ89 при $R_V = 3.1$, как зеленые области между эффективными длинами волн фильтров B и V , которые показаны вертикальными прямыми. Видно, что для всех циррусов оценки SFD98 согласуются с полученными нами оценками поглощений в фильтрах $gSDSS$ и $rSMSS$ с учетом

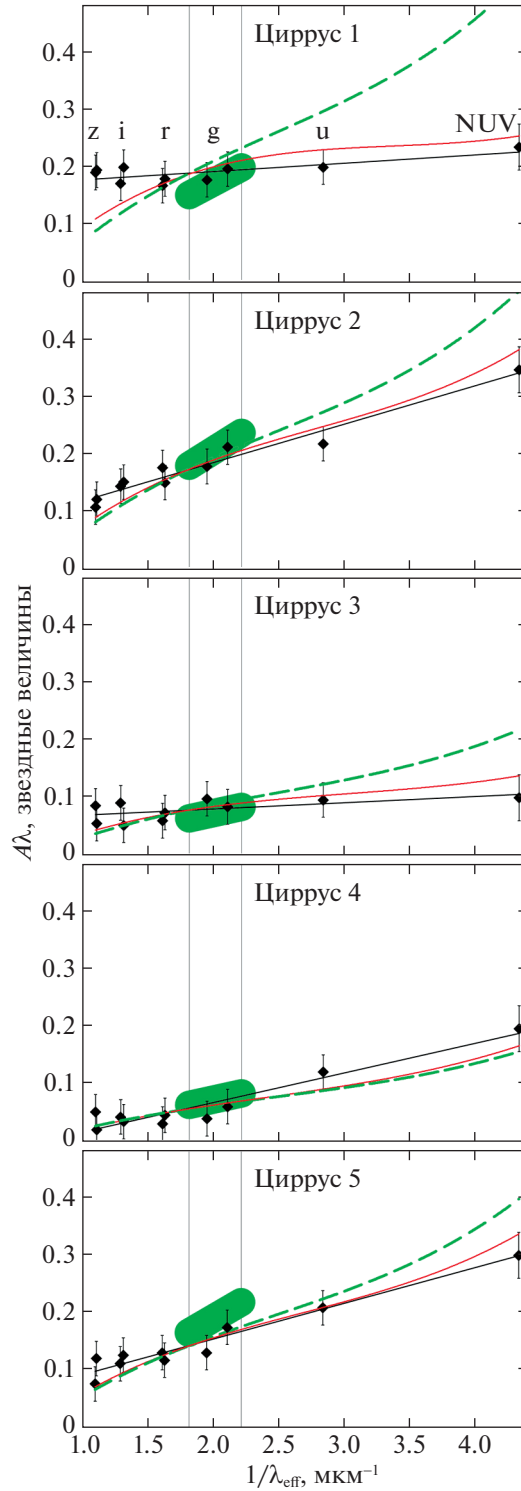


Рис. 4. Поглощение $A_{\lambda_{\text{eff}}}$ в зависимости от величины, обратной длине волны λ_{eff} в микронах, для рассматриваемых пяти циррусов: найденные поглощения — ромбы, их линейная аппроксимация — черная прямая, аппроксимация законом поглощения CCM89 с $R_V = 3.1$ — толстый зеленый пунктир, аппроксимация законом поглощения CCM89 с оптимальным R_V — тонкая красная кривая, эффективные длины волн фильтров B и V — вертикальные прямые, предсказание на основе SFD98 с законом поглощения CCM89 при $R_V = 3.1$ с учетом неопределенности — зеленая область. Буквами отмечены пары фильтров z_{SMSS} и z_{SDSS} , i_{SMSS} и i_{SDSS} , r_{SDSS} и r_{SMSS} , g_{SMSS} и g_{SDSS} , а также фильтры u_{SMSS} и GALEX NUV.

их неопределенностей (два черных ромба находятся внутри или касаются зеленых областей барами неопределенностей). Это значит, что наши результаты подтверждают правильность калибровки ‘ИК-эмиссия—покраснение’ для SFD98 в диапазоне длин волн между фильтрами B и V . В частности, это значит, что оценки поглощения внутри циррусов $\Delta A_{V,SFD98}$ из табл. 2 правдоподобны. Но из рис. 4 следует, что экстраполяция оценок SFD98 (зеленых областей) влево и вправо охватит наши результаты для других фильтров, пожалуй, только для цирруса 4. Следовательно, если наши оценки закона поглощения верны, предсказания SFD98, вообще говоря, не стоит экстраполировать на другие диапазоны длин волн. Этот вывод особенно важен для космологии и исследования внегалактических объектов, как показано Богомазовым, Тутуковым (2011).

ОБСУЖДЕНИЕ ЗАКОНА ПОГЛОЩЕНИЯ

Чилингарян и др. (2010), Чилингарян, Золотухин (2012) и Чилингарян и др. (2017, далее — CZK17) показали, что эллиптические галактики без текущего звездообразования, демонстрирующие небольшое красное смещение, после исправления их цвета за покраснение и введения k -поправки образуют на диаграммах цвет—абсолютная звездная величина компактную “красную последовательность” со сравнительно малой дисперсией по цвету. Это позволяет независимо сравнить наблюдаемый закон поглощения в рассматриваемых циррусах и в областях сравнения, проанализировав цвета таких галактик.

Для отбора эллиптических галактик в рассматриваемых нами циррусах и областях сравнения мы воспользовались выборкой Боттрелл и др. (2019), которая содержит результаты фотометрической декомпозиции почти 17 тысяч галактик в SDSS Stripe 82 с измеренными спектроскопическими красными смещениями. Мы не смогли воспроизвести критерии отбора галактик, примененные CZK17, так как в рассматриваемых циррусах и областях сравнения только меньшинство эллиптических галактик имеет точные фотометрические оценки в полосе GALEX NUV, лежащие в основе критериев CZK17. Однако мы получили достаточно полную выборку эллиптических галактик “красной последовательности” с помощью других критериев: показатель Серсика $n > 3.5$, видимая эллиптичность $e < 0.5$ и вклад дискового компонента в полную светимость $D/T = 0$. Стоит отметить, что наша выборка включает галактики с фотометрическими профилями, близкими к девокулеровским с $n = 4$ (де Вокулер, 1948) или даже более крутыми, что свойственно для ярких

эллиптических галактик (Каон и др., 1993). Из сформированной выборки мы отобрали только те галактики, у которых ошибки фотометрии в обеих полосах g и r меньше 0.1 (использованы петросяновские звездные величины вслед за CZK17).

В каждом циррусе и области сравнения оказалось примерно 200 галактик. Красное смещение этих галактик сравнительно мало (не превосходит $z = 0.3$ и имеет медиану $z = 0.1$), что необходимо для высокой точности вычисления k -поправки. Распределение галактик по абсолютной звездной величине примерно одинаково в циррусах и соответствующих областях сравнения, а также согласуется с распределением галактик, использованных CZK17, при тех же красных смещениях. Цвета и абсолютные величины галактик исправлены нами за покраснение и поглощение по карте SFD98 с использованием закона поглощения CCM89 при $R_V = 3.1$. Кроме того, мы применили k -поправку с использованием K -corrections calculator¹⁰, используя аналитические аппроксимации из Чилингаряна и др. (2010).

Исправленные нами цвета галактик должны систематически различаться в рассматриваемых циррусах и областях сравнения, если в них различен закон поглощения. При более плоском законе поглощения в циррусе по сравнению с соответствующей областью сравнения, т.е. при сравнительно большем поглощении в длинноволновой части спектра, как на рис. 4 для цирруса 1, цвета галактик будут переисправлены за покраснение и окажутся голубее. Этот эффект должен быть заметнее при большей разнице длин волн рассматриваемой пары фильтров, т.е., например, для цвета $u_{SMSS} - z_{SMSS}$. Однако фотометрия в полосе u_{SDSS} оказалась недостаточно точной. Наиболее многообещающие из остальных цветов, $g_{SDSS} - i_{SDSS}$ и $g_{SDSS} - z_{SDSS}$, показали очень схожие результаты. Поэтому мы обсуждаем только вариации цвета $g_{SDSS} - z_{SDSS}$. Медиана цвета $g_{SDSS} - z_{SDSS}$ для каждого цирруса и области сравнения представлена в табл. 4. В качестве неопределенности найденного цвета мы указали стандартное отклонение среднего, следуя подходу CZK17.

В табл. 4 показано, что только в циррусе 1 галактики заметно, на $\Delta(g_{SDSS} - z_{SDSS}) = 0.050 \pm 0.014$ звездной величины голубее, чем в соответствующей области сравнения. С другой стороны, рис. 4 показывает, что по диаграммам Вольфа цвет звезд в циррусе 1 на $\Delta(g_{SDSS} - z_{SDSS}) = 0.13 \pm 0.05$ голубее, чем по закону CCM89 при $R_V = 3.1$.

¹⁰<http://kcor.sai.msu.ru/>

Таблица 4. Медиана цвета $g_{SDSS} - z_{SDSS}$ отобранных галактик в циррусе и его области сравнения

Параметр	Циррус	Область сравнения
Циррус 1	1.33 ± 0.01	1.38 ± 0.01
Циррус 2	1.40 ± 0.01	1.39 ± 0.01
Циррус 3	1.39 ± 0.01	1.40 ± 0.01
Циррус 4	1.39 ± 0.01	1.41 ± 0.01
Циррус 5	1.38 ± 0.01	1.38 ± 0.01

Примечание. В качестве неопределенности указано стандартное отклонение среднего.

Результаты по звездам (диаграммам Вольфа) и по цветам галактик могут различаться прежде всего из-за различия в распределении используемых звезд и галактик на небе в комбинации с довольно грубым выделением нами циррусов как ячеек размером 6.1×6.1 угловой минуты в соответствии с угловым разрешением карты SFD98. Эти ячейки относились или не относились нами к циррусу целиком. Но так как волокна циррусов могут быть тоньше 6.1 угл. мин¹¹, возможно, только часть такой ячейки содержит циррус. Следовательно, только часть галактик в ячейке цирруса на самом деле служат для него фоном и демонстрируют тот же закон поглощения. В такой ситуации галактики в ячейке цирруса, фактически находящиеся вне его проекции на небо, увеличивают оценку $g_{SDSS} - z_{SDSS}$ для цирруса. Аналогично возможно и уменьшение оценки $g_{SDSS} - z_{SDSS}$ в области сравнения.

Кроме того, разногласия в результатах для звезд и галактик могут объясняться изменением закона поглощения с расстоянием, если в направлении цирруса есть три слоя пыли (перед, внутри и за циррусом) с разным законом поглощения. Первый слой дает поглощение и закон поглощения для области сравнения, первый и второй слои — для цирруса, все три слоя — для галактик. Как отмечено ранее, именно такое изменение закона поглощения

¹¹ Структура циррусов обсуждается Марчуком и др. (2021). Панопулу и др. (2022) показали, что характерная толщина волокна молекулярного облака составляет 0.1 пк, что для рассматриваемых нами циррусов означает 1.5 – 2 угл. мин. Панопулу и др. (2022) использовали содержательные данные, но допустили методическую ошибку, которую исправили в Corrigendum к их статье.

с расстоянием в высоких широтах было найдено Гончаровым (2012).

Отметим, что во всех циррусах и областях сравнения галактики оказались несколько голубее цвета, предсказанного CZK17 для “красной последовательности” с помощью их системы уравнений (1) в зависимости от абсолютной величины. Для всех циррусов и областей сравнения медиана предсказанного цвета оказалась одинакова: $g_{SDSS} - z_{SDSS} = 1.440 \pm 0.001$ (в качестве неопределенности указано стандартное отклонение среднего). Отобранная нами “красная последовательность” оказалась чуть голубее предсказанной, видимо, из-за различий в критериях отбора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы применили подсчеты звезд на диаграммах Вольфа для определения межзвездного поглощения в пяти галактических циррусах (волоконистых пылевых облаках с небольшим поглощением) SDSS Stripe 82, в средних и высоких галактических широтах. Для этого мы использовали УФ-фотометрию звезд в фильтре GALEX NUV, а также глубокую фотометрию красных карликов в пяти полосах обзора SDSS u_{SDSS} , g_{SDSS} , r_{SDSS} , i_{SDSS} , z_{SDSS} и четырех полосах обзора SMSS g_{SMSS} , r_{SMSS} , i_{SMSS} , z_{SMSS} . Циррусы выделены нами как области неба с повышенной ИК-эмиссией по карте SFD98. Поглощение в них вычислено относительно расположенных рядом областей сравнения с пониженной ИК-эмиссией по SFD98. Результаты для разных фильтров согласуются, давая для каждого цирруса диапазон расстояний и закон поглощения. Найденные расстояния в диапазоне 140 – 415 пк хорошо согласуются с трехмерными картами покраснения Гончарова (2017а), Грина и др. (2019) и Лаллемент и др. (2022).

В диапазоне длин волн между фильтрами B и V найденные поглощения согласуются с оценками из SFD98 при законе поглощения CCM89 с $R_V = 3.1$. Но для более коротко- и длинноволновых фильтров найденные поглощения существенно отклоняются от этого закона. Наблюдаемый закон поглощения лучше всего описывается как обратная пропорциональность поглощения и длины волны со своим коэффициентом для каждого цирруса. Наши результаты уверенно показывают очень слабое уменьшение поглощения с длиной волны для цирруса 1 и не исключают сравнительно слабое уменьшение для остальных циррусов. Это предполагает существенный вклад серого поглощения в полное поглощение. Эти результаты согласуются с прежними измерениями закона поглощения вдали от основной плоскости Галактики, представленными в обзоре Гончарова (2017б).

Настоящее исследование можно рассматривать как успешную пилотную проверку метода диаграмм Вольфа на современном наблюдательном материале. В дальнейшем можно привлечь фотометрические данные глубоких обзоров в других фильтрах и применить более рафинированное начальное выделение волокон циррусов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 20-72-10052).

Авторы благодарят Максима Ховричева за помощь в доступе к интернет-ресурсам, Таисию Рахматулину и Сергея Антонова за помощь в доступе к данным SkyMapper Southern Sky Survey, а также рецензентов за полезные замечания.

В настоящем исследовании 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>). Это исследование основано на данных обзора неба Sloan Digital Sky Survey (<http://www.sdss3.org/>). Используются цифровые продукты из SkyMapper Southern Sky Survey (<https://skymapper.anu.edu.au>), который принадлежит и управляется Исследовательской школой астрономии и астрофизики Австралийского Национального Университета. Исследование использует сервис “K-corrections calculator”, доступный на <http://kcor.sai.msu.ru/>, а также данные Galaxy Evolution Explorer, GALEX, одной из миссий NASA, управляемых Jet Propulsion Laboratory.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомазов А.И., Тутуков А.В., *Астрон. журн.* **88**, 541 (2011) [A.I. Bogomazov and A.V. Tutukov, *Astron. Rep.* **55**, 497 (2011)].
2. Боттрелл и др. (C. Bottrell, L. Simard, J.T. Mendel, and S.L. Ellison), *MNRAS* **486**, 390 (2019).
3. Брессан и др. (A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni), *MNRAS* **427**, 127 (2012).
4. 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).
5. Бьянки и др. (L. Bianchi, B. Shiao, and D. Thilker), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **230**, 24 (2017).
6. Вольф (M. Wolf), *Astron. Nachr.* **219**, 109 (1923).
7. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **38**, 15 (2012) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **38**, 12 (2012)].
8. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **39**, 620 (2013) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **39**, 550 (2013)].
9. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **42**, 494 (2016a) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **42**, 445 (2016a)].
10. Гончаров Г.А., *Астрофизика* **59**, 617 (2016b) [G.A. Gontcharov, *Astrophysics*, **59**, 548 (2016b)].
11. Гончаров Г.А., *Письма в Астрон. журн.* **43**, 521 (2017a) [G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **43**, 472 (2017a)].
12. Гончаров (G.A. Gontcharov), *Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz* (Ed. Yu.Yu. Balega, D.O. Kudryavtsev, I.I. Romanyuk, and I.A. Yakunin, San Francisco: Astron. Soc. of the Pacific, 2017), p. 71 (2017b).
13. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **472**, 3805 (2017).
14. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **475**, 1121 (2018).
15. Гончаров, Мосенков (G.A. Gontcharov and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **500**, 2590 (2021).
16. Горбиков, Брош (E. Gorbikov and N. Brosch), *MNRAS* **401**, 231 (2010).
17. Грин и др. (G.M. Green, E.F. Schlafly, C. Zucker, J.S. Speagle, and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **887**, 93 (2019).
18. Давенпорт и др. (J.R.A. Davenport, Z. Ivezić, A.C. Becker, J.J. Ruan, N.M. Hunt-Walker, K.R. Covey, A.R. Lewis, Y. AlSayyad, and L.M. Anderson), *MNRAS* **440**, 3430 (2014).
19. де Вокулер (G.H. de Vaucouleurs), *Annales d'Astrophysique* **11**, 247 (1948).
20. Жирарди и др. (L. Girardi, M.A.T. Groenewegen, E. Hatziminaoglou, and L. Da Costa), *Astron. Astrophys.* **436**, 895, (2005).
21. Каон и др. (N. Caon, M. Capaccioli, and M. D'Onofrio), *MNRAS* **265**, 1013 (1993).
22. Карделли и др. (J.A. Cardelli, G.C. Clayton, and J.S. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
23. Куликовский П.П., *Звездная астрономия* (М.: Наука, 1985).
24. Лаллемент и др. (R. Lallement, J.L. Vergely, C. Babusiaux, and N.L.J. Cox), *Astron. Astrophys.* **661**, A147, (2022).
25. Майснер, Финкбайнер (A.M. Meisner and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **798**, 88 (2015).
26. Мартин и др. (D.C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, P. Morrissey, P.G. Friedman, T.A. Barlow, T. Conrow, R. Grange, P.N. Jelinsky et al.), *Astrophys. J.* **619**, L1 (2005).
27. Марчук и др. (A.A. Marchuk, A.A. Smirnov, A.V. Mosenkov, V.B. Il'in, G.A. Gontcharov, S.S. Savchenko, and J. Roman), *MNRAS* **508**, 5825 (2021).

28. 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).
29. Панопулу и др. (G.V. Panopoulou, S.E. Clark, A. Nasar, F. Heitsch, J. Kainulainen, E. Ntormousi, D. Seifried, and R.J. Smith), *Astron. Astrophys.* **663**, C1, (2022).
30. Паренаго П.П., *Курс звездной астрономии* (М.: ГИТТЛ, 1954).
31. Планк (Planck Collaboration), *Astron. Astrophys.* **571**, A11 (2014).
32. Сзомору, Гухатакурта (A. Szomoru and P. Guhathakurta), *Astron. J.* **117**, 2226 (1999).
33. Стратева и др. (I. Strateva, Z. Ivezić, G.R. Knapp, V.K. Narayanan, M.A. Strauss, J.E. Gunn, R.H. Lupton, D. Schlegel, N.A. Bahcall, et al.), *Astron. J.* **122**, 1861 (2001).
34. Флири, Трухильо (J. Fliri and I. Trujillo), *MNRAS* **456**, 1359 (2016).
35. Чилингарян, Золотухин (I.V. Chilingarian and I.Yu. Zolotukhin), *MNRAS* **419**, 1727 (2012).
36. Чилингарян и др. (I.V. Chilingarian, A.-L. Melchior, and I.Yu. Zolotukhin), *MNRAS* **405**, 1409 (2010).
37. 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).
38. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkbeiner, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).