

Определение параметров межзвездного поглощения света по данным каталога Hipparcos

Ф.Амосов

11 ноября 2015 г.

Аннотация

Основная задача исследования — построение карты градиентов покраснения звезд вдоль луча зрения в окрестности Солнца на основе данных космической миссии Hipparcos. Отсутствующие в каталоге Hipparcos данные о классе светимости 49542 звезд северного экваториального полушария были восстановлены с помощью линейного бинарного классификатора, построенного на обучающем множестве 39807 звезд спектральных классов III и V. Для III класса светимости точность классификатора равна 95%, полнота — 89%. Для V класса светимости соответствующие характеристики равны 91% и 96%. Для 98827 звезд каталога HIPPARCOS определены покраснения звезд по показателю цвета B-V.

Для близких звезд (до 500 пк) получена карта значений градиента покраснения в направлениях, определяемых центрами 3888 равновеликих площадок, построенных методом HealPix. Определена статистическая надежность результатов для каждой площадки. Произведено сравнение наших карт покраснения с аналогичными картами, построенными в оптическом диапазоне, а также с аналогичными результатами, полученными другими авторами по данным каталога 2MASS в ближней инфракрасной области. Практическое совпадение этих карт свидетельствует о надежной работе использованного нами бинарного классификатора.

1 Введение

Как известно [1], пылевые облака в Галактике приводят к общему ослаблению света звезд (экстинции) и к покраснению звезд, то есть к увеличению их показателей цветов. Распределения покраснения звезд по небесной сфере может служить свидетельством о существовании межзвездной пыли в данном направлении. Общая задача поиска облаков межзвездной пыли, ответственной за поглощение света звезд, является трехмерной, то есть распределение пыли вдоль луча зрения требует знания расстояний до звезд, испытывающих покраснение.

Считается, что на эффекты межзвездного поглощения впервые указал в 1847 году В. Струве [3], а их систематическое изучение было начато в 1930 году [4]. В специальной литературе часто цитируется работа [5], в которой получены карты инфракрасного ИК-излучение пыли, соответствующие покраснению излучения звезд при прохождении света сквозь толщу всего галактического вещества на данном луче зрения. Успех выявления пылевых облаков в двумерном и трехмерном варианте определяется имеющимися в нашем распоряжении массовыми каталогами звезд, содержащими информацию о координатах и параллаксах звезд, а также спектральные и фотометрические данные - спектральный класс, класс светимости и звездные величины в различных фотометрических полосах. За последние годы было осуществлено два грандиозных проекта, результаты которых позволили получить существенно продвижение в задаче об обнаружении облаков межзвездной пыли в Галактике. Первый проект — это миссия HIPPARCOS [6], позволившая получить на миллисекундном уровне точности значения параллаксов приблизительно для 100 000 звезд. Выполнение второго проекта — 2 MASS [7] позволило получить точную фотометрию примерно 470 миллионов звезд в ближней инфракрасной области (в полосах J — 1.2 μ m, H — 1.6 μ m и Ks — 2.2 μ m). В работе [8] эти данные были использованы для исследования покраснения $E(J - K_s)$ 70 млн. звезд и построения трехмерной карты покраснения звезд

в радиусе 1600 пк от Солнца. На основе этой работы была создана трехмерная карта межзвездного поглощения в ближайшем килопарсеке [9].

Сразу после создания каталога HIPPARCOS появились в печати две статьи [10], [11], в которых для изучения межзвездного покраснения и определения расстояний до молекулярных облаков использовались тригонометрические параллаксы звезд, полученные в ходе выполнения проекта Hipparcos, и фотометрия в полосах B и V, заимствованная из наземных наблюдений. К сожалению, спектральные классы используемых звезд были известны в основном только для отрицательных склонений, что не позволило авторам получить соответствующие результаты в северном полушарии.

В настоящей работе поставлена задача устранить этот недостаток путем определения классов светимости звезд северного полушария с помощью метода машинного обучения [15], [16]. Теория обучения машин (machine learning, машинное обучение) — это самостоятельная математическая дисциплина, находящаяся на стыке прикладной статистики, численных методов оптимизации и дискретного анализа. В настоящее время технология машинного обучения нашла широкое применение в различных задачах обработки данных, в том числе и в астрономии [18]. Наша работа основана на построении бинарного классификатора, результатом работы которого является назначение звезде с известной абсолютной звездной величине класса светимости. Постановка задачи о построении классификаторов приведена в Приложении.

2 Исходные данные

2.1 Общие сведения о каталоге Hipparcos

В 1989 году Европейское Космическое Агентство (ESA) осуществило запуск космического аппарата HIPPARCOS (HIgh Precision PARallax COllecting Satellite — «спутник для сбора высокоточных параллаксов») с целью получения положений, собственных движений и параллаксов звезд на миллисекундном уровне точности. Космический аппарат проработал на орбите 37 месяцев, в течение которых он выполнял астрометрические и фотометрические измерения звезд по заданной программе. Обработка этих наблюдений привела к созданию двух каталогов: Hipparcos[6], содержащего информацию о 118218 звездах с точностью определения положений, годичных собственных движений и параллаксов на уровне 1 mas (milli arc second), и каталога Tycho[21], содержащего уже свыше 1 млн. звезд, с точностью измерения тех же параметров до 25 mas.

Положения и собственные движения звезд в Hipparcos приводятся в фундаментальной системе ICRS (International Celestial Reference System), реализованной в настоящее время с помощью каталога внегалактических радиоисточников, получившего название ICRF (International Celestial Reference Frame). Следует отметить, что достигнутая точность привязки осей координат системы отсчета каталога HIPPARCOS к осям ICRF оценивается величиной 0.6 mas по всем трем углам поворота и величиной 0.25 mas/год по всем трем компонентам вектора остаточного взаимного вращения двух систем отсчета.

В 2007 году вышла новая редакция астрометрических данных каталога Hipparcos [20] — каталог HIPNEWCAT (HIPparcos NEW astrometric CATalog). Утверждается, что точность положений, параллаксов и собственных движений всех звезд, ярче $H_P = 8$, улучшена в 4 раза, а для всех остальных звезд более, чем в 2 раза. Уменьшена взаимная корреляция параметров иногда в 10 раз. Именно эта версия использовалась в работе в качестве источника астрометрических данных.

В 2012 году вышел в свет каталог XHIP (An Extended Hipparcos Compilation) [22], в котором помимо сведений, содержащихся в HIPNEWCAT, собрана дополнительная богатая информация. Для 116 096 звезд приведена спектральная классификация, 46 392 звезд снабжены информацией о лучевых скоростях. В этой базе данных приведены результаты фотометрии в полосах I,J,K, заимствованной из каталога 2MASS. Для 114 315 звезд указаны спектральные классы, при этом для 73 842 звезд приведены классы светимости.

2.2 Фотометрические системы каталогов Tycho и Hipparcos

Фотометрические измерения на основном инструменте спутника HIPPARCOS выполнялись в широкой полосе (обозначаемую как H_P). В дополнение, почти для всех звезд каталога была выполнена двухцветная фотометрия (фотометрия Tycho величины V_T и B_T). Точность определения H_P составляет $0.0004^m - 0.007^m$ (для звезд $2 - 12^m$), а точность одного измерения — $0.003^m - 0.05^m$.

Фотометрические системы H_P , V_T и B_T — это инструментальные системы, и они не совпадают с общепринятой системой Джонсона. Используя значения звездной величины V_J по шкале Джонсона и показателя цвета для 8000 стандартных звезд с хорошими фотометрическими данными в системе B_T и V_T , были получены следующие эмпирические линейные соотношения, применимые к диапазону $-0.2 < (B - V)_T < 1.8$:

$$V_J = V_T - 0.090(B - V)_T$$

$$(B - V)_J = 0.850(B - V)_T$$

Точность этих преобразований в среднем лучше, чем 0.015^m для V_J и 0.05^m для $(B - V)_T$. Эти преобразования применимы к звездам, чей цвет не искажен межзвездным поглощением, и игнорируют зависимость от класса светимости. Формулы вообще не применимы к звездам класса M, даже если их показатель цвета $(B - V)_T < 1.8^m$.

2.3 Спектральные характеристики звезд

Каталог Hipparcos для большинства звезд содержит информацию о спектральном типе, полученную из наземных наблюдений. Основной источник — Мичиганский каталог [24] и несколько других каталогов. Однако, информация о спектральных классах приведена только для звезд южного экваториального полушария (рис.1).

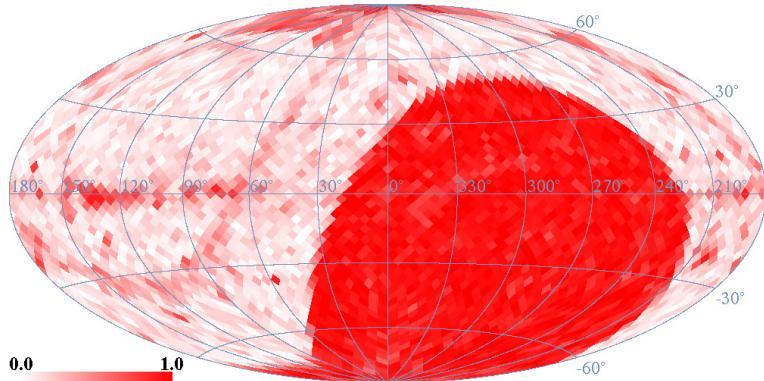


Рис. 1: Распределение звезд на небесной сфере, для которых в каталоге HIPPARCOS имеются сведения о классе светимости. Чем больше в пикселе доля звезд, имеющих класс светимости, тем он краснее. Видим отсутствие класса светимости практически у всех звезд северного экваториального полушария.

2.4 Используемые данные

В каталоге Hipnewcat отсутствуют спектральные данные, поэтому в данной работе они были взяты из каталога Hipparcos. Также из каталога Hipparcos были взяты значения видимой звездной величины V . Итак, мы рассматривали только те звезды, которые имеют данные о положении, параллаксе в Hipnewcat и данные о спектральном типе и видимой звездной величине в Hipparcos. Кроме того, мы не рассматривали звезды, у которых в каталоге Hipnewcat указано число компонент более одной. Число

таких звезд получилось равным 98827, но, в данной работе использовалось только 94199 звезд III и V классов светимости, для которых можно было определить покраснение.

Таким образом, в нашей работе использовалась следующая информация:

- положения звезд (каталог Hipnewcat)
- параллаксы звезд (каталог Hipnewcat)
- фотометрия (V_{mag} - каталог Hipparcos)
- класс светимости (каталог Hipparcos)

Дополнительные сведения об используемых данных можно найти в работах [12]- [14].

3 Покраснение

3.1 Определение

Межзвездное поглощение может быть описано избытком цвета. Избыток цвета мы будем называть «покраснением». *Покраснение* звезды есть

$$E = E_{B-V} = (B - V)_{obs} - (B - V)_{int}, \quad (1)$$

где $(B - V)_{obs}$ — ее видимый показатель цвета звезды (с учетом межзвездного поглощения), а $(B - V)_{int}$ — теоретический показатель цвета звезды (без учета межзвездного поглощения). Значение $(B - V)_{obs}$ мы можем получить на основе данных фотометрии звезды из каталога. Значение $(B - V)_{int}$ мы получим воспользовавшись приведенной в [1] двумерной таблицей «спектральный класс, класс светимости — показатель цвета». То есть, для получения $(B - V)_{int}$ звезды нам нужно знать ее спектральный класс и класс светимости.

Приведем пример расчета покраснения на звезде HIP 44800,

- У нее в каталоге $(B - V)_{obs} = 0.535^m$
- Класс F7V, поэтому (по таблице таблице из [1]) $(B - V)_{int} = 0.493^m$
- Покраснение $0.535^m - 0.493^m = 0.042^m$

Покраснение — это количественное измерение межзвездного поглощения, поэтому мы можем сказать, что «между нами и звездой HIP 44800 пыли на 0.042^m ».

4 Способ получения классов светимости

Как мы увидели в обзоре данных каталога Hipparcos, практически у всех звезд северного экваториального полушария отсутствует класс светимости. Для нас его наличие чрезвычайно важно, ввиду того, что мы на основе класса светимости и спектрального класса рассчитываем истинное значение $B - V$ для звезд $(B - V)_{int}$. Тем самым, отсутствие класса светимости у половины звезд делает невозможным проведение наших расчетов для всего северного экваториального полушария.

Для исправления этого недостатка используем метод машинного обучения. Натренируем классификатор, который будет определять класс светимости для звезды по двум факторам — ее показателю цвета $B - V$ и ее абсолютной звездной величине M_V . Этих факторов должно быть достаточно, т.к. классы светимости теоретически разделимы на диаграмме Герцшпрунга-Рессела.

В каталоге HIPPARCOS доля звезд, которые не относятся ни к III, ни к V классам светимости мала (16,3%, 8058 из 49285). Поэтому, мы упростим задачу — обучим линейный бинарный классификатор, который будет предсказывать III или V класс. Сделаем это с помощью метода опорных векторов [16], основные положения которого приведены в Приложении.

Таблица 1: Структура обучающего множества

класс светимости	$B - V < 0.6$	$B - V \geq 0.6$	всего
III	1947	16681	18628
V	15549	5630	21179
III & V	17496	22311	39807

В качестве обучающего множества возьмем все звезды, у которых присутствует класс светимости III и V. Таких звезд 39807. Распределение этих звезд по классам светимости показано в таблице 1:

Диаграмма Герцшпрунга-Рессела, соответствующая нашему обучающему множеству, показана на рис. 2, а карта звезд этого множества — на рис. 3.

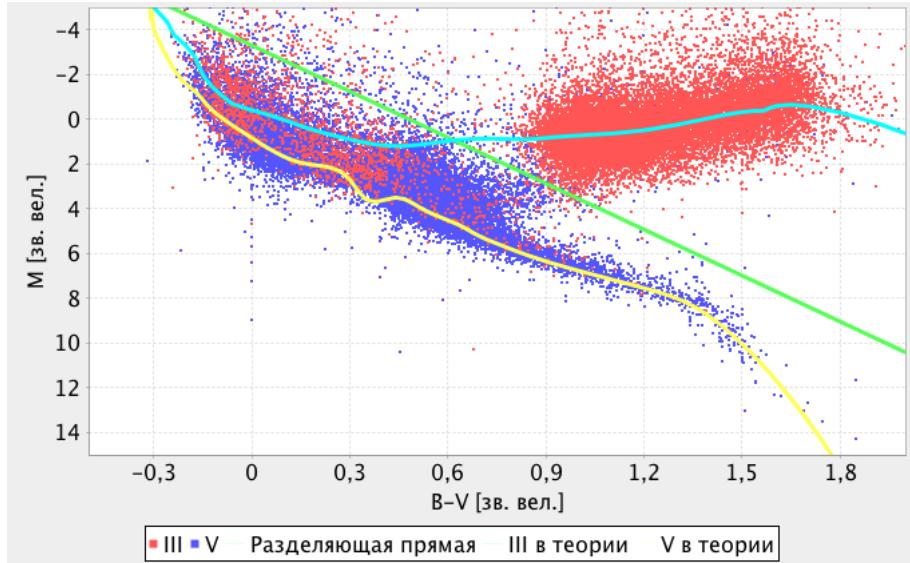


Рис. 2: Диаграмма Герцшпрунга-Рессела обучающего множества звезд (табл. 1). Разделяющая линия — зеленый цвет, теоретические кривые для III и V классов светимости показаны голубым и желтыми цветами соответственно.

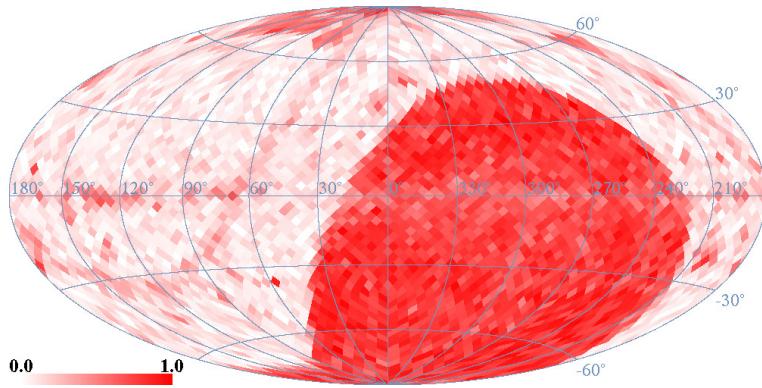


Рис. 3: Распределение звезд обучающего множества по небесной сфере. Отличие от рис.(1) в том, что здесь показаны звезды только III и V классов светимости.

Результатом обучения классификатора является разделяющая классы прямая, уравнение которой имеет следующий вид:

$$F(B - V, M) = -3.0752 \cdot (B - V) + 0.4485 \cdot M + 1.4793 = 0, \quad (2)$$

где $B - V$ – показатель цвета, M – абсолютная звездная величина.

Мы видим, что при показателе цвета $B - V \geq 0.6$ классификатор работает практически идеально, но при $B - V < 0.6$ и $F(B - V, M) > 0$ он всем звездам предсказывает V класс при большой доле звезд III класса в обучающем множестве (10.3%, 1758 из 17029). При $B - V < 0.6$ звезды III и V класса неразделимы, поэтому для этой половины можно принять другое решение – результат работы классификатора будет взвешенным средним III и V классов, то есть некоторым средним классом, $(B - V)_{int}$, у которого будет равен

$$(B - V)_{int} = w_1 \times (B - V)_{int}(III) + w_2 \times (B - V)_{int}(V). \quad (3)$$

В этой формуле веса w_1 и w_2 , ($w_1 + w_2 = 1$) логично взять в соответствии с априорной вероятностью классов в этой области (0.1 и 0.9).

В таблице двумерной спектральной классификации ([1]) у спектрального типа G2 показатель цвета при III классе 0.733, при V – 0.630. Это максимальная разница между III и V классом в интересующем нас диапазоне. Класс, соответствующий средневзвешенному решению будет иметь показатель цвета

$$(B - V)_{int} = 0.1 \cdot 0.733 + 0.9 \cdot 0.630 = 0.64, \quad (4)$$

то есть, даже в наихудшем случае отличие от V класса минимальное – 0.01^m – гораздо ниже уровня ошибок показателя цвета в каталоге HIPPARCOS. Поэтому в дальнейшем мы всегда будем использовать решение классификатора в этой области по V классу.

С учетом этого соглашения проведем оценку качества работы классификатора с помощью процедуры 10-fold кросс-валидации. Полученные оценки параметров классификатора (точность, полнота и F1-мера) приведены в следующей таблице:

Решение классификатора →	III	V	Класс	Точность	Полнота	F1-мера
III	16636	1992	III	95%	89%	92%
V	783	20396	V	91%	96%	93%

Как видим, классификатор имеет приемлемое качество, и с его помощью мы определили классы светимости 49542 звезд северного экваториального полушария. В этом каталоге содержится следующая информация:

- номер звезды в каталоге HIPPARCOS;
- галактические долготы и широты звезд, град;
- звездная величина в полосе V;
- спектральный класс;
- класс светимости.

Электронная версия каталога доступна по адресу github.com/amosov-f/dust-detector/tree/R-1.0/dust/src/test/resources/predict-lumin.txt.

5 Градиент покраснения по расстоянию

5.1 Идеальная кривая покраснения

Предположим, что на некотором луче зрения бесконечно много звезд, и они расположены на нем всюду плотно. Пусть для каждой звезды мы можем идеально измерить ее покраснение. Тогда, ход покраснения на этом луче зрения должен иметь вид, показанный на рис. 4 красной линией. Покраснение



Рис. 4: Идеальный ход покраснения на луче зрения. По оси x отложено расстояние по лучу зрения, а по y — покраснение у соответствующих звезд.

должно всегда монотонно расти, т.к. пыль присутствует всюду. Очевидно, что там, где покраснение растет быстрее — пыли больше, там где медленнее — меньше. Поэтому, можно сказать, что облака на этом луче зрения находятся там, где покраснение растет «очень быстро» (синие области на рис.4).

Тем самым, построение кривых покраснения в разных направлениях на небе может позволить находить области повышенного межзвездного поглощения, то есть находить пылевые облака.

Как было сказано выше, для каждой звезды, у которой известны видимый показатель цвета ($B - V$) и класс светимости, можно вычислить покраснение. Если для всех таких звезд известны еще и их пространственные координаты с хорошей точностью, то мы можем говорить о пространственном распределении покраснения звезд, то есть о функции $E = E(r)$. Ввиду того, что практически все значения $E(r)$ очень сильно запущлены разного рода ошибками, не удается проследить истинный ход этих функций. Поэтому приходится ограничиться линейной функцией $E(r) = kr$, параметры которой можно оценить методом наименьших квадратов. Таким образом, в данной работе ход покраснения по лучу зрения моделируется линейной функцией kr , а основной результат работы заключается в вычислении трендов покраснения звезд k в различных направлениях.

Построение кривых покраснения в разных направлениях позволит нам понять пространственное распределение межзвездного поглощения (пыли). Звезд в каталоге не бесконечное число, поэтому реальные кривые покраснения будут не непрерывными кривыми, а будут наборами точек, описывающими ход покраснения. Аналогично, вместо звезд на луче зрения мы должны использовать звезды в малых конусах. Поэтому, ход покраснения у нас будет выглядеть, к примеру, так, как показано на рис. 5.

6 Карты градиентов покраснения звезд

В дальнейшем мы будем обозначать площадки, соответствующие «пикселям» разбиения Healpix как $\{P_i\}_{i=0}^{N_{pix}-1}$, а конусы, высекаемые соответствующими пикселями, — через $\{C_i\}_{i=0}^{N_{pix}-1}$ (У нас $N_{pix} = 3888$).

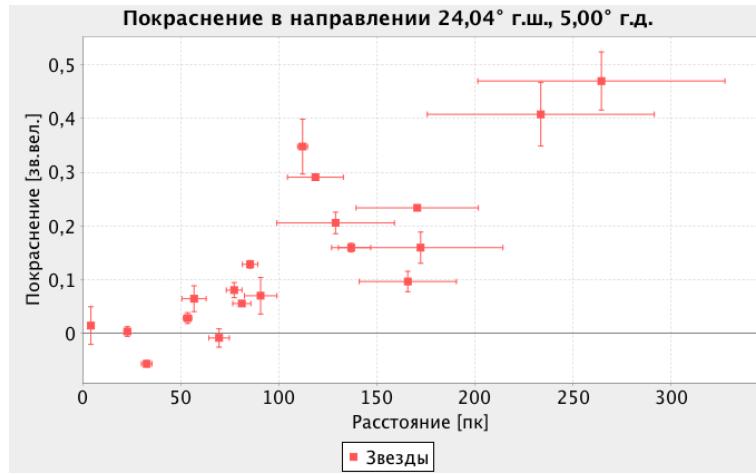


Рис. 5: Ход покраснения звезд по расстояниям в направлении $l = 5^{\circ}.00, b = 24.04^{\circ}$. По горизонтали расстояния в пк, по вертикали — покраснение (зв. вел.).

Такое разбиение позволит нам

1. рассмотреть ход покраснения в каждом конусе как одномерную функцию $E(r)$. Это корректно, ввиду того, что конусы достаточно узкие;
2. сделать наши результаты «независимыми», т.к. конусы не пересекаются;
3. поместить в каждый конус примерно одинаковое число звезд, чтобы избежать недостатка звезд в некоторых конусах.

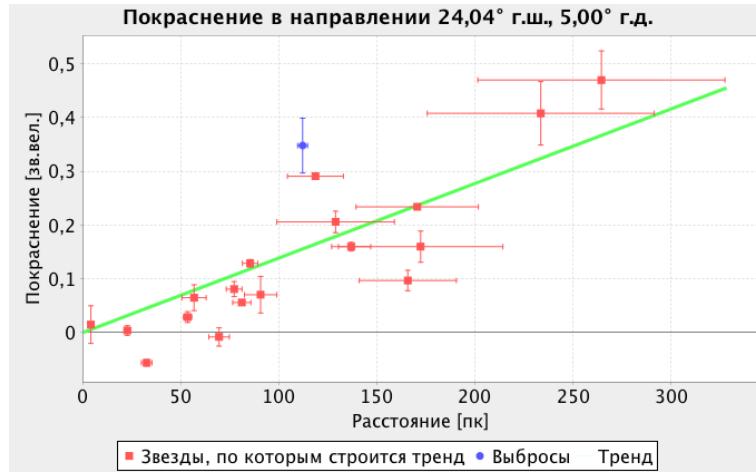


Рис. 6: Ход покраснения звезд по расстояниям в направлении $l = 5^{\circ}.00, b = 24.04^{\circ}$. По горизонтали расстояния в пк, по вертикали — покраснение (зв. вел.). При вычислении градиента k отброшена одна точка (синий цвет). Данные из каталога Hipparcos.

6.1 Вычисление тренда и устранение выбросов

Будем моделировать покраснение звезд вдоль луча зрения линейной функцией $E(r) = kr$. Свободный член можно считать нулевым, т.к. у ближайших звезд покраснения не должно быть ввиду очень малого объема пыли на луче зрения. Параметр k модели, соответствующей каждому конусу C_i , находится с помощью метода наименьших квадратов. При этом мы проводили отбор данных, так как метод наименьших квадратов очень чувствителен к выбросам, т.е. большие ошибки значений покраснения и/или параллакса могут очень сильно испортить результат. Для устранения этого недостатка после построения тренда по всем звездам в конусе, мы выбрасывали те звезды, которые давали самые большие отклонение от найденного тренда. Затем, новое значение тренда определялось уже только по оставшимся звездам. После выброса 10% самых плохих звезд тренд, к примеру, может быть таким, как это показано на рис. 6. В данном случае, мы выбросили одну звезду (синюю). Разумеется, нельзя выбрасывать слишком много звезд из-за опасности «подгонки» данных под модель. В нашем случае порог 10% звезд — это обычно 0, 1 или 2 звезды в каждом конусе.

6.1.1 Выбросы, обусловленные большой ошибкой параллакса

Очевидно, что сильные выбросы дают далекие звезды, для которых параллакс определен с большой ошибкой. Отбрасывание таких звезд в нашем методе вычисления тренда приводит к уменьшению объема пространства, по которому проводится данное исследование. На рисунке 7 показана гистограмма распределения относительного числа оставшихся звезд, по которым были получены градиенты покраснения. Мы видим, что доля звезд до 300 пк составляет 71%, до 400 пк — 83%, до 500 пк — 89%. Отсюда можно заключить, что подавляющее число звезд, для которых в нашей работе построены градиенты покраснения, находятся на гелиоцентрических расстояниях до 500 пк.

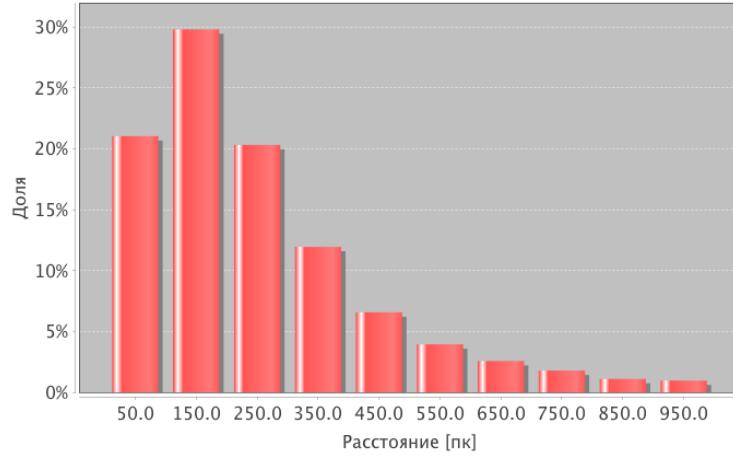


Рис. 7: Гистограмма относительного распределения по расстояниям тех звезд, по которым вычислялись тренды покраснения.

6.1.2 Выбросы, обусловленные большой ошибкой покраснения

Выбросы могут давать звезды с большими ошибками в покраснении. Покраснение есть $E = (B - V)_{obs} - (B - V)_{int}$, поэтому его ошибка $\sigma_E = \sqrt{\sigma_{(B-V)_{obs}}^2 + \sigma_{(B-V)_{int}}^2}$.

Ошибки $\sigma_{(B-V)_{obs}}$ приведены в каталоге Hipparcos. Зависимость их средних значений от видимой звездной величины представлена на гистограмме 8. Видим, что большие ошибки $(B - V)_{obs}$ характерны

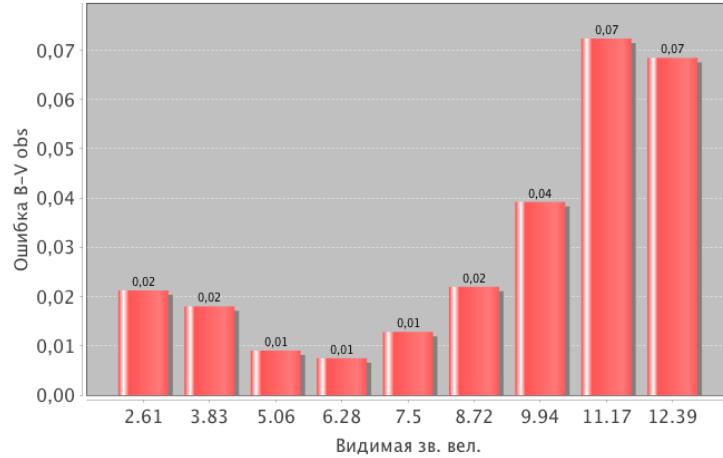


Рис. 8: Гистограмма распределения среднего значения ошибки $(B - V)_{obs}$ от V_{mag}

Таблица 2: Разница значений в таблицах $(B - V)_{int}$ из работ [1] и [2] (представлена разность «[2] - [1]»)

	V	III	V
O5	0.00	F5	0.00
O8	0.01	G0	0.00
B0	0.00	G5	0.00
B3	-0.01	K0	0.01
B5	0.00	K5	0.01
B8	0.01	M0	0.00
A0	0.00	M2	0.00
A5	0.00	M5	-0.07
F0	0.00		-0.06

для звезд слабее 11^m . Но доля таких звезд менее 3% (гистограмма 9), поэтому ошибки $(B - V)_{obs}$ можно считать приемлемыми.

К сожалению, ошибки $\sigma_{(B - V)_{int}}$ не представлены в работах [1], [2]. Значения в соответствующих таблицах $(B - V)_{int}$ указаны с точностью до двух знаков после запятой, поэтому можно полагать, что $\sigma_{(B - V)_{int}}$ имеет порядок 0.01^m . Для подтверждения данного уровня значений $\sigma_{(B - V)_{int}}$ представим таблицу 2 — разницу значений $(B - V)_{int}$, приведенных в двух работах [1], [2]. Видим, что значения показателя цвета существенно различаются только у поздних спектральных классов. Доля звезд спектрального класса M в каталоге Hipparcos менее 4%, поэтому можно принять значение $\sigma_{(B - V)_{int}} = 0.01^m$ для всех звезд.

Гистограмма ошибок покраснения от видимой звездной величины 10 в совокупности с распределением звезд по звездным величинам 9 позволяет говорить о том, что уровень ошибок покраснения, полученного по данным каталога Hipparcos, составляет 0.03^m , что является приемлемым значением. Тем не менее, некоторые звезды имеют больше ошибки в покраснении и могут быть выброшены в нашем методе вычисления тренда (рис. ?? справа).

6.2 Распределение коэффициента k по небесной сфере

Тем самым, ход покраснения в конусе C_i мы описываем одним числом k_i — скоростью роста покраснения в этом конусе. Она, как мы ранее выясняли, должна коррелировать с наличием пыли. Поэтому, составив карту распределения коэффициента k , мы составим двумерную панораму распределения пыли в окрестности Солнца с радиусом до 500 пк..

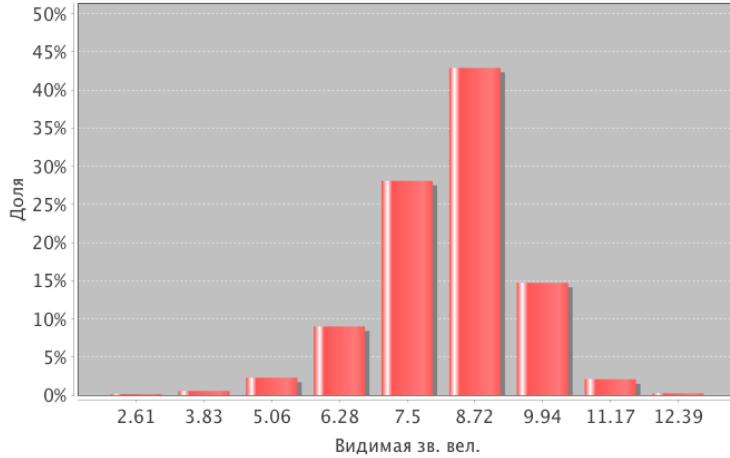


Рис. 9: Распределение звезд по видимым звездным величинам

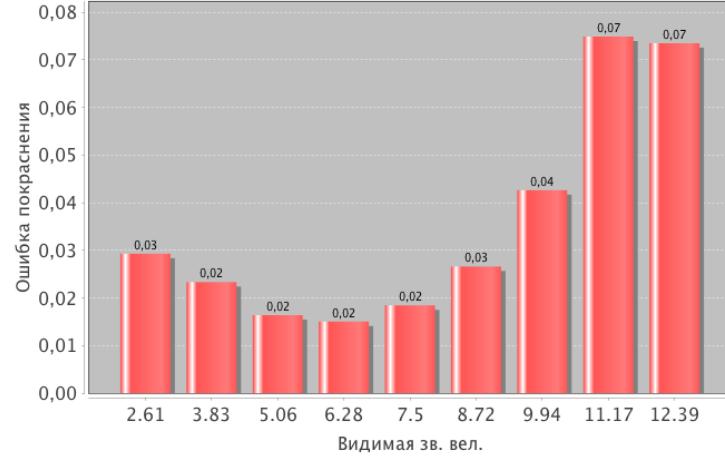


Рис. 10: Гистограмма распределения среднего значения ошибки покраснения от V_{mag}

На рисунке 11 показана карта распределения градиентов покраснения звезд для звезд обучающего множества. Черным цветом закрашены те площадки, для которых звезды обучающего множества не позволяют вычислить покраснение, так как для них не известны классы светимости. Число таких площадок равно 1678.

Как было сказано выше, определение спектрального класса для остальных звезд, не входящих в обучающее множество, нами производилось с помощью двумерного линейного классификатора. Карта градиентов покраснения, построенная с помощью классификатора показана на рис.12. Сравнение этих карт с рис.11 показывает, что примененный нами метод машинного обучения для сортировки звезд по III и V классам светимости позволил получить информацию о межзвездном покраснении практически для всей небесной сферы.

Электронная версия каталога значений градиента покраснения для центров 3888 площадок доступна по адресу
github.com/amosov-f/dust-detector/tree/R-1.0/dust/src/test/resources/table-k.txt

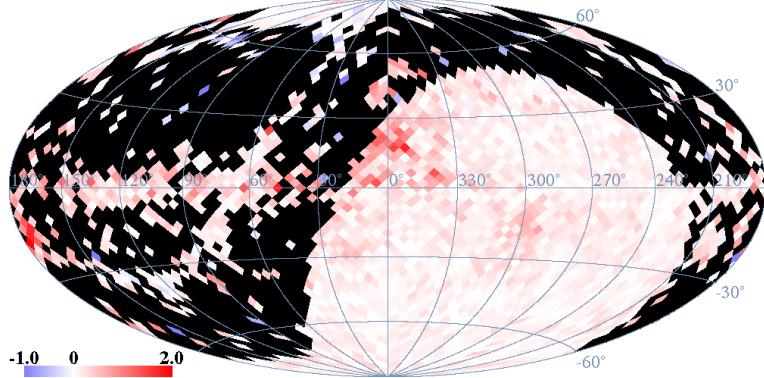


Рис. 11: Распределение градиента покраснения, построенного по звездам, для которых можно определить покраснение только по данным каталога Hipparcos. Черным цветом отмечены 1678 пикселей, в которых нет даже 5-ти звезд. Границы цветовой шкалы указаны в зв. вел. на кпк.

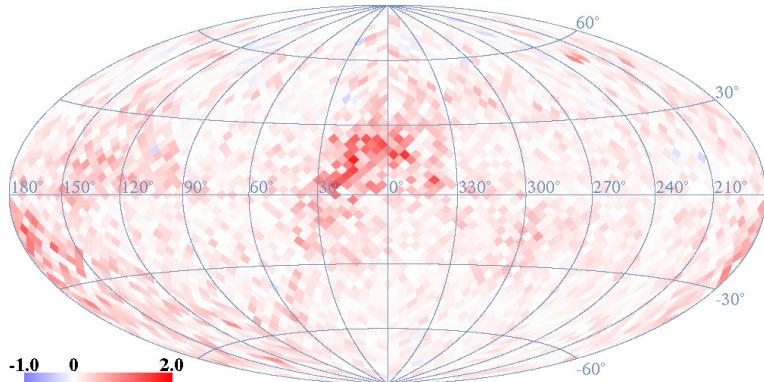


Рис. 12: Распределение градиента покраснения, построенного по звездам, для которых можно определить значение покраснения (94199 звезд). Границы цветовой шкалы указаны в зв. вел. на кпк.

6.3 Статистическая надежность градиентов покраснения

На рисунке 12 показаны в условной шкале цветов значения градиентов покраснения для всех использованных нами 3888 площадок неба. Наибольшее значение найденных градиентов составляет 1.71 м/кпк , среднее значение -0.15 м/кпк , среднее значение ошибки градиента -0.04 м/кпк . В связи с этим интересно поставить вопрос о статистической достоверности значений градиентов, найденных в каждой площадке. Традиционно при сделанном предположении о нормальном распределении градиентов ответ на этот вопрос можно получить, вычислив отношение значения градиента к его среднеквадратичной ошибке. Известно, что при $k/\sigma_k=3$ надежность результата составляет 99.87 процента (правило трех сигм), при $k/\sigma_k=2$ надежность результата составляет 97.72 процентов. На рисунке 13 показаны черным цветом площадки, для которых $k/\sigma_k < 2$, то есть те площадки, на которых надежность определения градиентов покраснения не превышает 97.72 процентов.

6.4 Сравнение с результатами, полученными Кнуде и Хегом [10]

В работе Кнуде и Хега [10] определялись расстояния до ближайших пылевых облаков по зависимостям покраснения E_{B-V} от расстояния, полученным из данных каталога Hipparcos [6]. Из-за име-

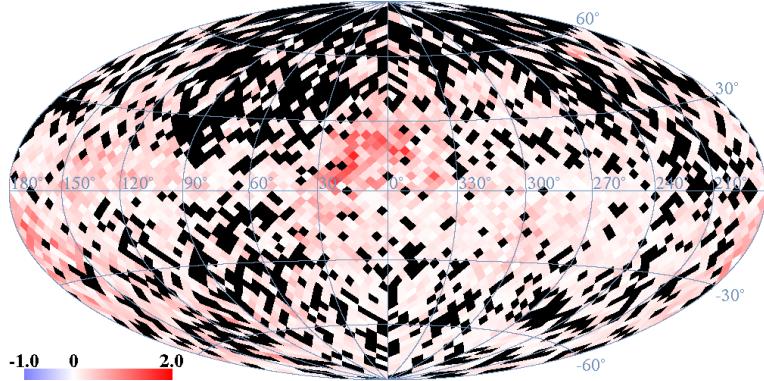


Рис. 13: Карта, на которой черным цветом отмечены пиксели, в которых $k < 2\sigma_k$. Границы цветовой шкалы указаны в зв. вел. на кпк.

Таблица 3: Сравнение градиентов покраснения \hat{k} из работы [10] с результатами настоящей работы. № – номер площадки, n – число звезд в площадке.

Направление (l, b)	результаты [10]		результаты данной работы			
	радиус	\hat{k} [м/кпк]	№	центр (l, b)	n	k [м/кпк]
(304, 1) – South. Coalsack	4°	0.6	1897	(305, 2.12)	45	0.13 ± 0.01
			1968	(302.5, 0)	24	0.47 ± 0.05
			2041	(305, -2.12)	28	0.17 ± 0.03
(300, -15) – Chameleon Region	6°	0.8	2400	(302.5, -12.84)	20	0.41 ± 0.08
			2472	(300, -15.02)	22	0.57 ± 0.11
			2544	(302.5, -17.24)	19	0.15 ± 0.04
(337, 8) – Lupus 4	4°	0.6	1543	(337.5, 12.84)	28	0.40 ± 0.06
			1544	(342.5, 12.84)	23	0.38 ± 0.05
			1687	(337.5, 8.52)	27	0.27 ± 0.07
			1688	(342.5, 8.52)	20	0.57 ± 0.09
			1759	(335, 6.38)	35	0.41 ± 0.04
			1760	(340, 6.38)	26	1.34 ± 0.12
(342.5, 9) – Lupus 5	4°	0.8	1543	(337.5, 12.84)	28	0.40 ± 0.06
			1544	(342.5, 12.84)	23	0.38 ± 0.05
			1545	(347.5, 12.84)	27	0.42 ± 0.05
			1616	(340, 10.67)	29	0.24 ± 0.12
			1617	(345, 10.67)	22	0.10 ± 0.03
			1618	(350, 10.67)	27	0.40 ± 0.06
			1759	(335, 6.38)	35	0.41 ± 0.04
			1760	(340, 6.38)	26	1.34 ± 0.12
(341, 13.6) – Lupus region	8°	0.6	1616	(340, 10.67)	29	0.24 ± 0.12
			1472	(340, 15.03)	27	0.64 ± 0.05
			1255	(337.5, 21.74)	26	0.61 ± 0.07
(360, -20) – Corona Australis	5°	0.4	2556	(0, -19.47)	32	0.30 ± 0.05
			2700	(0, -24.04)	33	0.39 ± 0.06
(355, 20) – The Ophiucus region	6°	1.5	1331	(355, 19.47)	27	0.68 ± 0.12
			1332	(2.5, 17.24)	17	0.76 ± 0.16
			1115	(357.5, 26.39)	24	0.82 ± 0.06

Таблица 4: Координаты областей неба с большими градиентами покраснения звезд.

№	№ площадки	центр (l°, b°)	центр (RA^h, Dec°)	созвездие	число звезд	k (м/кпк)
1	1188	(2.5, 21.74)	(16.58, -14.47)	Змееносец	19	1.38 ± 0.16
	1261	(5, 19.47)	(16.80, -13.95)		18	1.18 ± 0.11
	1117	(5, 24.04)	(16.55, -11.24)		25	1.22 ± 0.11
2	1768	(22.5, 4.25)	(18.28, -7.29)	Змея	15	1.54 ± 0.20
	1696	(20, 6.38)	(18.08, -8.47)		19	1.27 ± 0.21
	1623	(17.5, 8.52)	(17.87, -9.59)		19	1.33 ± 0.19
3	2303	(175, -10.67)	(4.88, 26.95)	Телец	25	1.28 ± 0.17
	2374	(172.5, -12.84)	(4.64, 27.48)		19	0.89 ± 0.31
	2519	(177.5, -17.24)	(4.62, 20.95)		23	0.99 ± 0.18
	2446	(170, -15.03)	(4.40, 27.85)		20	0.85 ± 0.23
4	2737	(185, -24.04)	(4.55, 11.24)	Телец	23	0.91 ± 0.13
	2808	(182.5, -26.39)	(4.33, 11.60)		32	0.85 ± 0.10
5	399	(228.21, 52.97)	(10.42, 12.87)	Лев	16	0.92 ± 0.12
	398	(221.79, 52.97)	(10.30, 16.35)		26	0.72 ± 0.11

ющегося дефицита классов светимостей в этом каталоге авторы приводят графики покраснения от расстояния $E(r)$ в некоторых направлениях только в южном экваториальном полушарии. По этим графикам можно оценить значение градиента покраснения \hat{k} для некоторых направлений. В таблице 3 приведено сравнение коэффициентов \hat{k} , оцененных в [10], и полученных нами данной работе. Таблица 3 показывает, что результаты данной работы находятся в хорошем согласии с результатами работы [10].

Отметим, что в нашей работе проблема с отсутствующими классами светимости решена, что дает возможность изучить ход покраснения по всей небесной сфере, а не только в южном экваториальном полушарии. В таблице 4 приведены координаты областей неба с большими градиентами покраснения, которые невозможно было определить средствами, использованными в работе [10]. Положения этих областей хорошо соответствуют списку близких (до 500 пк) крупнейших поглощающих облаков, приведенных в [8].

6.5 Сравнение с результатами, полученными с помощью 2MASS

На рисунках 15-16 показаны распределения по небесной сфере показателей цвета $J-H$ и $H-K_s$ звезд по данным каталога 2MASS [7]. Мы видим, что показатели цвета в ближней инфракрасной области ($J - 1.2 \mu m$, $H - 1.6 \mu m$ и $K_s - 2.2 \mu m$), показывают те же области, которые мы получили по покраснению $E(B - V)$ в оптическом диапазоне. Строго говоря, наши результаты можно сравнивать только с показателями цветов, исправленными за стандартные значения, то есть с величинами

$$E = E_{J-H} = (J - H)_{obs} - (J - H)_{int}, \quad E = E_{H-K_s} = (H - K_s)_{obs} - (H - K_s)_{int}. \quad (5)$$

Зависимость стандартных (intrinsic) показателей цвета $B-V$, $J-H$, и $H - K_s$ от спектрального класса показаны на рис. 17 ([1], [23]), на которых видно, что в формулах (5) поправка за стандартное значение показателя цвета намного меньше, чем для $B-V$. Кроме того, эти поправки слабо зависят как от спектра звезд, так и от спектрального класса, то есть практически одинаковы для всех звезд. Это обстоятельство позволяет считать, что карты цветов в ближней инфракрасной области рис.15 и рис.16 показывает детали, которые напрямую обуславливаются именно межзвездным поглощением.

7 Заключение

Перечислим основные результаты, полученные в работе.

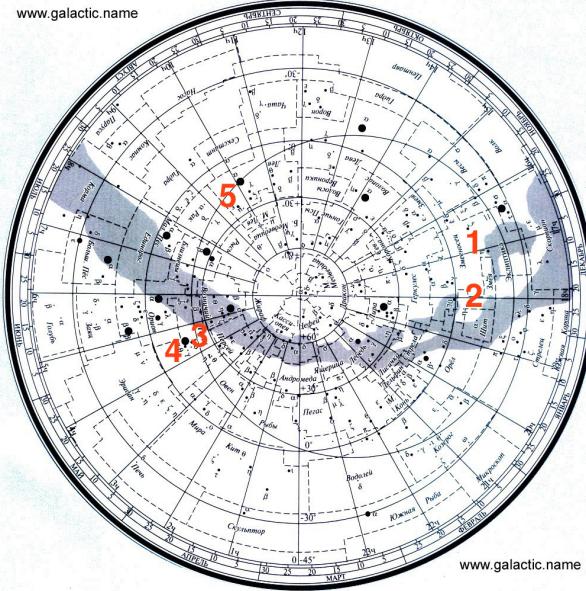


Рис. 14: Положения на карте неба областей покраснения из таблицы 4.

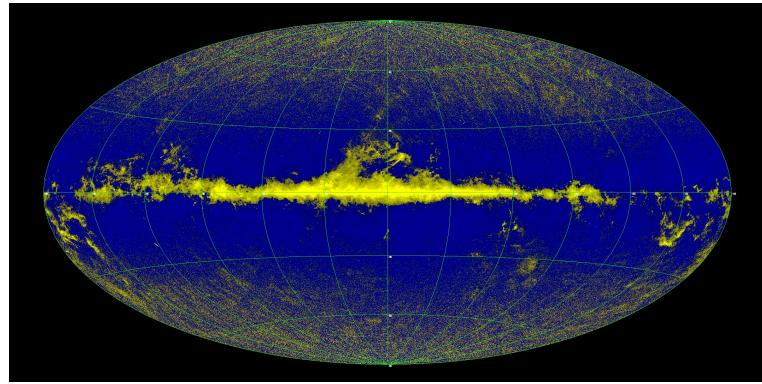


Рис. 15: Распределение по небесной сфере показателя цвета J-H (2MASS)

- Создан бинарный классификатор, позволяющий звезде с известной абсолютной звездной величиной назначить класс светимости III или V. Для III класса светимости точность классификатора равна 95%, полнота — 89%. Для V класса светимости соответствующие характеристики равны 91% и 96%.
- Для 49542 звезд каталога HIPPARCOS с помощью бинарного классификатора определены классы светимости. Электронная версия этого каталога доступна по адресу github.com/amosov-f/dust-detector/tree/R-1.0/dust/src/test/resources/predict-lumin.txt
- Для 94199 звезд каталога HIPPARCOS определены покраснения звезд по показателю цвета $B-V$.
- Для звезд с расстояниями до 500 пк получена карта значений градиента покраснения в направлениях, определяемых центрами 3888 равновеликих площадок, построенных методом HealPix.

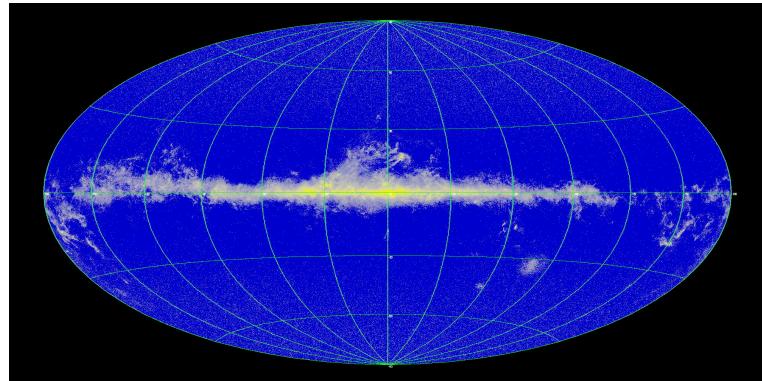


Рис. 16: Распределение по небесной сфере показателя цвета $H - K_s$ (2MASS)

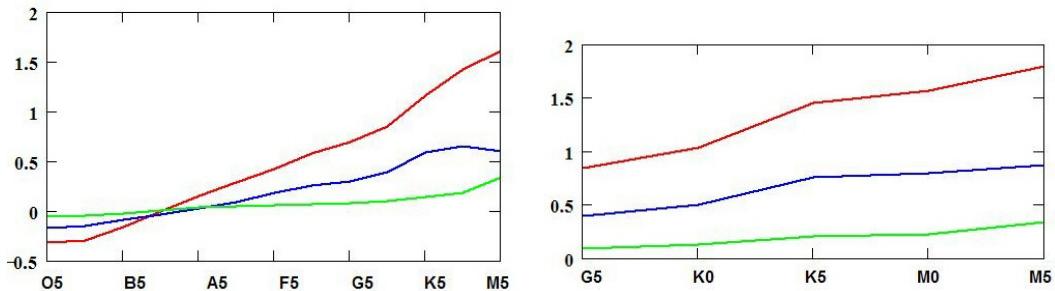


Рис. 17: Стандартные показатели цвета в зависимости от спектрального класса. Слева спектральный класс V, справа — III. B-V (красная линия), J-H (синяя линия); $H - K_s$ (зеленая линия)

Электронная версия этого каталога доступна по адресу
github.com/amosov-f/dust-detector/tree/R-1.0/dust/src/test/resources/table-k.txt

- Определена статистическая надежность результатов для каждой площадки.
- Произведено сравнение карт покраснения, полученных нами в оптическом диапазоне, с аналогичными результатами, полученными в ближней инфракрасной области по данным каталога 2MASS. Практическое совпадение этих карт свидетельствует о надежной работе использованного нами бинарного классификатора.

Список литературы

- [1] Бинни, Меррифилд (J. Binney and M. Merrifield), *Galactic Astronomy* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1998).
- [2] В. Страйжис, *Многоцветная фотометрия звезд*. Вильнюс, 1977.
- [3] Struve, F. G. W., St. Petersburg: Tip. Acad. Imper., IV . 165 p., (1847)
- [4] Trumpler, R. J., "Preliminary results on the distances, dimensions and space distribution of open star clusters". *Lick Observatory Bulletin* 14 (420): 154–188. (1930).

- [5] Schlegel, David J.; Finkbeiner, Douglas P; Davis, Marc, "Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds". *Astrophysical Journal*. v. 500, p/ 525.(1998)
- [6] Perryman M.A.C., Lindegren L., Kovalevsky J., Hog E., Bastian U., Bernacca P.L., Creze M., Donati F., Grenon M., Grewing M., van Leeuwen F., van der Marel H., Mignard F., Murray C.A., Le Poole R.S., Schrijver H., Turon C., Arenou F., Froeschle M., Petersen C.S., "The Hipparcos Catalogue"(1997A&A...323L..49P)
- [7] Скрутски и др., (Skrutskie, M. F., and 30 colleagues), The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *The Astronomical Journal* 131, 1163-1183, (2006).
- [8] Г. А. Гончаров, Трехмерная карта покраснения звезд по фотометрии 2MASS: метод и первые результаты, ПАЖ, том 36, №8, с. 615–627, 2010.
- [9] Г. А. Гончаров, Трехмерная карта межзвездного поглощения в ближайшем килопарсеке, ПАЖ, том 38, №2, с. 108-121, 2012.
- [10] J. Knude and E. Hog, Interstellar reddening from the Hipparcos and Tycho catalogues I. Distances to nearby molecular clouds and star forming regions. *Astron. Astrophys.*, 338, p. 897–904 (1998).
- [11] J. Knude and E. Hog, Interstellar reddening from the Hipparcos and Tycho catalogues II. Nearby dust features at the NGP associated with approaching HI gas. *Astron. Astrophys.*, 341, p. 451457 (1999).
- [12] Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos, СПб.: СПбГУ, (2005).
- [13] Цветков А.С. Руководство по работе с каталогом TYCHO-2, СПб.: СПбГУ, (2006).
- [14] А. С. Цветков, А. В. Попов, А. А. Смирнов. Неточности в спектральной классификации звезд каталога Tycho-2., ПАЖ, т.34, N1, с.1-11, (2008)
- [15] Hastie, T.; Tibshirani, R. & Friedman, J. (2001), *The Elements of Statistical Learning* , Springer New York Inc. , New York, NY, USA .
- [16] V.N.Vapnik *The Nature of Statistical Learning Theory* 1995.
- [17] Gorski et al. *HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere* 2005.
- [18] Zeljko Ivezić, Andrew J. Connolly, Statistics, Data Mining, and Machine Learning in Astronomy. Princeton University Press. 533 p., 2014
- [19] Hog E., Baessgen G., Bastian U., Egret D., Fabricius C., Grossmann V., Halbwachs J.L., Makarov V.V., Perryman M.A.C., Schwkendiek P., Wagner K., Wicenec A., "The Tycho Catalogue" *Astron& Astrophys.*, 323L,57H. 1997.
- [20] Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data van Leeuwen F., *Astron. Astrophys.* 474, 653 (2007),
- [21] Wright et al. *Tycho-2 Spectral Type Catalog* 2003: *The Astronomical Journal*
- [22] Anderson, E.; Francis, Ch. XHIP: An extended hipparcos compilation, *Astronomy Letters*, Volume 38, Issue 5, pp.331-346, 2012.
- [23] V. Straizys and Romualda Lazauskaite. Intrinsic Color Indices and Luminosity Sequences of Stars in the 2MASS Two-color Diagram , *Baltic Astronomy*, vol. 18, 19–31, 2009.
- [24] Houk N. et al. Michigan Catalog of Two-dimensional Spectral Types for HD Stars. Vol. 1-5. Ann. Arbor: Univ. Michigan Dept. Astron. 1978, 1982, 1975, 1988, 1999.