

Авдеева Александра Сергеевна

**Исследование параметров звёзд и определение
межзвёздного поглощения по данным больших
современных обзоров неба**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Национальном исследовательском институте «Высшая Школа Экономики».

Научный руководитель — доктор физико-математических наук,
доцент
Малков Олег Юрьевич

Официальные оппоненты — Бобылев Вадим Вадимович,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН Главная (Пулковская) астроно-
мическая обсерватория РАН,
главный научный сотрудник

Дамбис Андрей Карлович,
доктор физико-математических наук,
Государственный астрономический ин-
ститут имени П.К. Штернберга МГУ
им. М.В. Ломоносова, заведующий от-
делом

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджет-
ное учреждение науки Специальная
астрофизическая обсерватория Россий-
ской академии наук, п. Нижний Архыз

Защита состоится 27 сентября 2024 года в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д.48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан 15 августа 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета
24.1.032.01, к.ф.-м.н

Н. В. Чупина

Общая характеристика работы

Современная астрономия сталкивается с вызовом обработки и анализа огромных объемов данных, получаемых благодаря большим астрономическим обзорам и миссиям. Большие проекты, такие как Gaia, WISE, 2MASS, LAMOST и другие предоставляют обширные наборы данных, включающие фотометрические наблюдения, спектроскопические измерения, астрометрические параметры и другие характеристики звезд и галактик. Эти данные являются бесценным ресурсом для ученых, но их анализ требует разработки новых методов обработки и интерпретации.

Одной из конкретных задач является обнаружение и классификация коричневых карликов среди множества небесных объектов. Вследствие низкой светимости коричневых карликов, вместо спектроскопических методов для их обнаружения зачастую используется метод отбора по показателям цвета. Методы машинного обучения, основанные на анализе фотометрических данных из больших обзоров неба, позволяют автоматически выделять и идентифицировать коричневые карлики на основе их цветовых характеристик и блесков.

Другая важная задача – это разработка и использование методов для получения надежных оценок эффективных температур звезд. Эта обширная проблема включает в себя создание флагов качества для температур, полученных в различных обзорах. Зачастую эффективные температуры, полученные даже в рамках одного подхода, могут иметь различную степень надежности. Флаги качества помогают выбрать только наиболее качественные данные для дальнейшего изучения.

Изучение межзвездного поглощения в различных областях Галактики также является крайне важной задачей. Данные спектроскопии, фотометрии и астрометрии позволяют определять характеристики межзвездного поглощения в зависимости от направления на небе. Использование больших астрометрических обзоров, таких как Gaia, в сочетании с данными спектроскопических наблюдений, позволяет оценить параметры поглощения на луче зрения, а также полное галактическое поглощение.

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Коричневые карлики – это субзвездные объекты, которые были теоретически предсказаны [1; 2], а затем спустя 30 лет обнаружены [3; 4]. С тех пор поиск [5–7] и систематическое изучение известных коричневых карликов [8–10] не прекращались. Масса этих объектов недостаточна для начала и поддержания стабильного термоядерного синтеза гелия из водорода, что приводит к их постепенному остыванию. Пик интенсивности излучения приходится на инфракрасный диапазон, объекты относительно слабо излучают в видимом спектре. В спектральной классификации для коричневых карликов выделены спектральные типы L, T и Y.

Согласно работе [11], количество коричневых карликов в Галактике находится в пределах от 25 до 100 миллиардов. Для различных видов исследований необходимы однородные и полные выборки коричневых карликов. Кинематические исследования [12], исследования двойных звезд с коричневыми карликами [13] и исследования параметров Галактики требуют статистических параметров коричневых карликов. Коричневые карлики занимают промежуточное положение между звездами и планетами, таким образом, изучение свойств коричневых карликов помогает уточнить наше понимание их различий. Полные и однородные каталоги позволяют идентифицировать и характеризовать коричневые карлики с большей точностью, что позволяет лучше определить нижний предел массы для формирования звезд и верхний предел массы для формирования планет. Более того, коричневые карлики имеют сходства с экзопланетами-гигантами, что делает их ценными образцами для изучения атмосфер экзопланет. Изучая атмосферы коричневых карликов, аналогичные атмосферам экзопланет, мы можем получить представление о процессах и условиях, определяющих атмосферы экзопланет, включая наличие облаков, состав атмосферы и тепловые профили.

Возможно, самой актуальной проблемой, связанной с коричневыми карликами, является L/T-переход [14–16]. L/T-переход у коричневых карликов – явление, характеризующееся резким изменением показателя цвета ($J - K_s$) и блеска H коричневых карликов, которые происходят для объектов находящихся на границе L и T классов. Рассматривается несколько механизмов, которые могут быть ответственны за этот эффект. Модели облаков связывают резкий переход с опусканием пылевых облаков под фотосферу [17; 18]. Нестабильность в углеродной химии в атмосферах коричневых карликов была предложена как еще один механизм [19]. Адиабатическая конвекция, вызванная этой нестабильностью, может привести к изменчивости цвета в спектральной последовательности L/T. Рассеивание облаков выдвигается в качестве альтернативного механизма L/T-перехода [20]. Предполагается, что облака, состоящие из более крупных частиц, рассеиваются легче, чем облака, состоящие из меньших частиц. Переход от спектральных типов L к типам T может сопровождаться переходом от мелких частиц к крупным, что приводит к фрагментации облаков и переходу к атмосферам, лишенным облаков [21; 22]. Подробный обзор проблемы можно найти в [23].

Большая часть потока, излучаемого L и T карликами, находится в ближнем инфракрасном диапазоне от 1 до 2.5 микрометра. Низкие температуры карликов поздних M, L и T типов приводят к появлению богатого ближнего инфракрасного спектра, содержащего многие особенности: от относительно узких линий нейтральных атомов до широких молекулярных полос, каждая из которых имеет различные зависимости от температуры,

силы тяжести и металличности. Типичные атмосферы известных коричневых карликов имеют температуру от 2200 до 750 К.

Наиболее надежным методом идентификации коричневых карликов является спектроскопия, которая позволяет непосредственно анализировать состав атмосферы этих объектов. Спектроскопические данные позволяют идентифицировать характерные признаки, такие как спектральные линии лития или атмосферного метана, которые служат важными индикаторами коричневых карликов. Кроме того, особенности спектров коричневых карликов классов L, T и Y позволяют отличить их друг от друга. Например, L карлики характеризуются полосами эмиссии и заметными атомными линиями щелочных металлов, таких как натрий и калий. T карлики, в свою очередь, показывают сильные полосы поглощения H_2O и монооксида углерода (CO) в инфракрасном диапазоне. Y карлики имеют спектры с пиками поглощения около 1.55 микрометра, что, вероятно, связано с поглощением аммиака. Эти различия в спектрах позволяют классифицировать коричневые карлики и более точно определять их физические свойства.

В то время как спектроскопия необходима для подтверждения природы коричневого карлика и изучения его детальных свойств, проведение спектроскопических наблюдений для большого количества объектов на всем небе является затратным по времени и ресурсам. Например, самый крупный современный спектроскопический обзор LAMOST не содержит спектров коричневых карликов, поскольку они являются слишком слабыми для наблюдения его инструментами. С другой стороны, фотометрические обзоры могут охватить намного большую область неба и получать данные о многочисленных небесных объектах одновременно.

Применяя техники выбора по цвету в фотометрических исследованиях, можно выявить объекты, проявляющие цвета, характерные для коричневых карликов. Преимущество использования фотометрических исследований заключается в том, что они позволяют систематически и в широком масштабе искать потенциальных кандидатов в коричневые карлики, помогая выявлять многообещающие объекты для последующих спектроскопических наблюдений.

Например, авторы [9] провели поиск в обзорах SDSS, UKIDSS и WISE. Они применили критерий выбора по цвету: $(Y - J) > 0.8$ и $J < 17.5$, как правило отбора коричневых карликов из всего массива данных. С таким подходом им удалось обнаружить около 1300 коричневых карликов в области 3000 квадратных градусов, что составляет примерно 7.5% небесной сферы. Еще одним примером поиска коричневых карликов с помощью цветового отбора является работа [7]. В ней использованы данные обзоров DES, VHS и WISE. Были применены следующие критерии по цвету для поиска коричневых карликов: $(i - z) > 1.2$, $(z - Y) > 0.15$, $(Y - J) > 1.6$, и

$z < 22$. Наложение ограничения на звездную величину в полосе z необходимо для обеспечения полноты набора данных, чтобы исключить тем самым пропущенные значения. В пределах области, охватывающей 2400 квадратных градусов, что составляет примерно 5.8% небесной сферы, благодаря такому подходу было идентифицировано примерно 12 тысяч коричневых карликов. В работе [7] также представлен обзор других работ по отбору коричневых карликов по цвету.

Методы машинного обучения все чаще применяются для классификации астрономических объектов из-за огромного объема данных, собранных за последние десятилетия. Например, в работе [24] были использованы методы Опорных Векторов (SVM), Случайного Леса (RF) и многослойного персептрона для классификации массивных звезд в близлежащих галактиках. Точность классификации на тестовом наборе данных составила 83%. Применение этих методов к другим галактикам (не включенным в тренировочный набор данных), таким как IC1613, WLM и Sextans A, показало точность на уровне 70%. Снижение точности классификации относительно тестового набора данных авторы связывают с различными значениями металличности и поглощения в других галактиках. В работе исследовались два метода заполнения пропущенных данных в каталогах, а именно, заполнение простыми средними значениями и методом *Iterative Imputer* из библиотеки Scikit-learn [25]. Метод *Iterative Imputer* вычисляет отсутствующие значения на основе имеющихся значений признаков так же, как это делают модели регрессии. Этот метод, будучи в то же время более устойчивым, показал лучшие результаты и на классификации.

Интерпретируемые методы машинного обучения (Localized General Matrix LVQ и RF) были использованы в работе [26] для обнаружения ультракомпактных карликовых галактик (UCDs) и шаровых скоплений. В то время как зачастую модели машинного обучения представляют собой черные ящики, что снижает доверие к результатам, для некоторых методов можно вычислить важность отдельных признаков. Если то, насколько важным является тот или иной признак, можно объяснить с помощью физических механизмов или особенностью исследуемых объектов, метод приобретает особую ценность. Авторы работы [26] проанализировали важность признаков и сравнивали их с признаками, несущими физическую информацию об объектах.

Точное определение эффективных температур звезд имеет первостепенное значение в различных областях астрономии и астрофизики. Знание точных и надежных температур небесных объектов позволяет судить об их внутренних свойствах, изучить стадии их эволюции и получить представление о фундаментальных астрофизических процессах.

Эффективные температуры, полученные из данных различных спектроскопических обзоров, использовались для характеристики асимптотической ветви гигантов в широком диапазоне масс и металличности [27] и необходимы для получения детальной информации о звездах диска и гало [28]. Как упоминалось выше, эффективные температуры используются для характеристики межзвездной среды в работе [29]. Аналогичным образом, в работе [30] были получены межзвездные поглощения для более миллиона звезд с использованием спектроскопических параметров обзоров LAMOST и GALAH [31].

На данный момент существует несколько спектроскопических обзоров с высоким разрешением, которые можно считать надежным источником фундаментальных параметров звезд. Это обзоры APOGEE [32; 33], GALAH, Gaia-ESO [34]. Последняя на данный момент версия каталога APOGEE – DR17 ($R \sim 22500$) включает информацию об объектах северного полушария, а также расположенных на выделенных участках южного неба. APOGEE в первую очередь направлен на изучение проэволюционировавших звезд в галактическом диске, в галактическом центре и во внешнем гало. Самая свежая версия каталога GALAH, DR3 ($R \sim 28000$), содержит звезды в диапазоне звездных величин $12 < V < 14$ и с галактической широтой $|b| > 10$ градусов. Обзор Gaia-ESO ($R \sim 16000 - 25000$) – это спектроскопический обзор, целью которого является получение высококачественной спектроскопии 100 000 звезд Млечного Пути, принадлежащих всем основным населением Галактики. Хотя эти обзоры имеют достаточное разрешение и отношение сигнала к шуму, они ограничены по охвату неба и яркости звезд. Мы сравниваем температуры Gaia GSP-Phot с эффективными температурами обзоров APOGEE на северном небе и GALAH на южном небе.

Третий выпуск данных Gaia (DR3) [35; 36] представляет беспрецедентный набор точных астрометрических, фотометрических данных и данных об астрофизических параметрах, что является по настоящему революционным. Он включает в себя информацию об атмосферных характеристиках сотен миллионов звезд, полученную с помощью нескольких независимых модулей, которые имеют разные наборы входных данных из Gaia [37]. Среди данных Gaia DR3 одними из самых ожидаемых являются спектры низкого разрешения Синего (BP) и Красного (RP) фотометров (описание и внутренняя калибровка [38; 39], внешняя калибровка [40]), позволяющие определять астрофизические параметры для сотен миллионов звезд.

Один из основных модулей, General Stellar Parametrizer from Photometry (GSP-Phot), дает оценки эффективной температуры T_{eff} , ускорения свободного падения на поверхности звезды $\log g$, металличности, абсолютной звездной величины M_G , радиуса, расстояния, поглощения на луче зрения A_0 , A_G , A_{BP} , A_{RP} и покраснения $E(BP - RP)$ путем прямого

моделирования спектров BP/RP с низким разрешением, видимой звездной величины G и параллакса с использованием методов Монте-Карло с марковскими цепями (MCMC). С этой целью GSP-Phot использует модели звездной эволюции для получения самосогласованных температур, ускорения свободного падения на поверхности звезды, металличности, радиусов и абсолютных звездных величин [41]. Модуль GSP-Phot предоставляет ряд астрофизических параметров, полученных с помощью различных кодов расчета звездной атмосферы, а именно, MARCS [42], PHOENIX [43], A и OB [44; 45] модели. Gaia DR3 приводит лучшие значения из полученных моделями в модуле GSP-Phot для 471 миллиона источников.

Эти параметры позволяют изучать свойства звезд, звездную эволюцию и состав различных звездных популяций в Галактике. Однако самосогласованное определение этих параметров может внести дополнительные систематические ошибки, особенно при оценке эффективной температуры T_{eff} . В работе [46] данные Gaia DR3 использовались в качестве литературных значений для сравнения калибровки спектров. Однако, им пришлось исключить все объекты с $T_{\text{eff}}^{\text{Gaia}} > 7000$ К из-за наблюдаемых систематических различий. В работе [47] также отмечается несоответствие между оценками T_{eff} Gaia DR3 GSP-Phot и собственными оценками авторов для звезд в рассеянных скоплениях Гиады и Плеяды. К сожалению, модуль GSP-Phot, несмотря на то, что он является богатейшим источником астрофизических параметров в Gaia DR3, не предоставляет флагов качества или других индикаторов, на которые можно положиться при использовании эффективных температур и других атмосферных параметров.

Предпринимаются попытки произвести переоценку эффективных температур, предоставляемых Gaia DR3 в модуле GSP-Phot. В исследовании [48] авторы использовали методы машинного обучения, в частности XGBoost, для создания новых оценок эффективных температур, а также металличности и ускорения свободного падения на поверхности звезды. Модель была обучена на атмосферных параметрах из обзора APOGEE для вычисления параметров по спектрам BP/RP, звездным величинам Gaia DR3 и CatWISE. Результаты представляют собой 175 миллионов звезд с пересмотренными атмосферными параметрами, показывающими хорошее согласие с параметрами из обзора APOGEE. В работе [49] предлагаются пересмотренные параметры звездных атмосфер для 220 миллионов звезд из Gaia DR3. В этом подходе используется модель спектров Gaia BP/RP, обученная с использованием данных LAMOST и дополненная фотометрией 2MASS и WISE. Этот метод повышает точность и уменьшает вырождение параметров, что приводит к лучшим оценкам параметров звезд.

Учет поглощения света в межзвездном пространстве является важным этапом в каждом астрономическом и астрофизическом исследовании. По этой причине трехмерные карты и модели межзвездного покраснения или поглощения являются очень важными инструментами. Более того,

распределение межзвездной пыли, которая в основном ответственна за поглощение, само по себе представляет интерес в контексте изучения эволюции и структуры Галактики.

Одним из основных источников для оценки покраснения и поглощения любого внегалактического объекта до сих пор является двумерная карта, представленная в работе [50]. Эта карта основана на данных космических миссий NASA COBE/DIRBE и IRAS (ISSA) по излучению пыли в дальнем инфракрасном диапазоне, в частности, на длине волны 100 мкм. Излучение было рассчитано от наблюдателя до бесконечности, включая весь слой пыли вдоль средней плоскости Галактики. Поскольку диффузное излучение в дальнем инфракрасном диапазоне напрямую связано с поверхностной плотностью межзвездной пыли, такую карту можно использовать как меру поглощения внегалактических объектов.

Здесь мы представляем обзор работ, в которых представлены трехмерные карты поглощения. Работа [51] основана на популяционном синтезе Галактики с использованием фотометрии 2MASS. Полученная трехмерная карта доступна в виде таблицы в базе данных Vizier. В работах [52; 53] используются байесовские методы для создания трехмерной карты. Авторы работы [52] используют фотометрические данные обзора INT Photometric H-Alpha Survey (IPHAS). Однако, поглощение изучается только для низких галактических широт, главным образом в галактической плоскости. В работе [53] используются данные Gaia, Pan-STARRS DR1 и 2MASS. Карта охватывает примерно три четверти небесной сферы и имеет ограничение по минимальному расстоянию из-за перенасыщения близких звезд в обзоре Pan-STARRS. Типичное значение этого предела составляет около 300 парсек, то есть за основной массой пыли в областях высоких галактических широт.

Авторы работы [54] использовали метод регуляризованного байесовского подхода к данным избытка цвета, ранее полученным в работах [55; 56] а также на основе Женевско-Копенгагенского обзора [57; 58]. Этот метод получил развитие в работе [59], где была использована фотометрия обзора 2MASS и астрометрия Gaia DR2. Результатом работы стала трехмерная карта межзвездной пыли в пределах 3 кпк. Обе карты доступны в виде таблиц. У первой упомянутой работы есть онлайн-сервис для извлечения значения покраснения для выделенного направления (или направлений). Результаты второй работы представлены в виде таблицы, построенной в евклидовых координатах, без возможности извлечения данных для конкретного направления.

В работе [60] используется фотометрия 2MASS и WISE, а также оптические наблюдения с телескопа Шмидта Хуцзи 1.04/1.20-m (XSTPS-GAC) для создания трехмерной карты поглощения в полосе g . Карта охватывает площадь более 6000 квадратных градусов вокруг антицентра Галактики ($140 < l < 240$, $-60 < b < 40$) с пространственным угловым разрешением (в

зависимости от широты) от 3 до 9 угловых минут. Для решения этой задачи в работе сделана выборка из 132316 эталонных звезд с нулевым значением поглощения. Далее эта выборка используется для создания стандартной библиотеки распределений энергий в спектре. Поскольку покраснение или поглощение влияет на видимую и ультрафиолетовую часть спектра, но слабо влияет на инфракрасную область спектра, то сравнение наблюдаемого распределения энергии в спектре с эталоном позволяет определить из этих данных значение покраснения. Для выборки, состоящей из примерно 13 миллионов звезд, обладающих надежной фотометрией, этим методом было определено поглощение в полосе g . Карта охватывает диапазон расстояний от 0 до 4 кпк. Однако на расстояниях более 3 кпк она становится менее надежной из-за меньшего количества звезд с высококачественной фотометрией, доступной для оценки поглощения.

В исследовании [61] проанализировано распределение 70 миллионов звезд из 2MASS с высокоточной фотометрией (лучше 0,05 зв.величины) на диаграмме $(J - K_s) - K_s$. Один из пиков этого распределения состоит из карликов, субкарликов и субгигантов типа F со средней абсолютной величиной M_{K_s} в 3 звездные величины. Сдвиг этого пика в сторону больших значений $(J - K_s)$ с увеличением K_s отражает покраснение этих звезд с увеличением расстояния или поглощения на луче зрения. В результате в каждой пространственной ячейке среднее расстояние и средняя звездная величина K_s оказываются взаимосвязаны друг с другом, что позволяет оценить поглощение на заданном расстоянии.

В отличие от карт, модели поглощения определяются некоторыми формулами, что делает их более удобными в использовании. Тем не менее, различные параметры формул также могут быть представлены в табличной форме, поскольку их различия в разных частях небесной сферы могут быть значительными. Здесь мы также кратко рассмотрим существующие на сегодняшний день модели.

Первая модель, разработанная [62], представляет собой барометрическую (экспоненциальную) функцию:

$$A_V(b, d) = \frac{a_0 \cdot \beta}{\sin |b|} \left(1 - \exp \left(\frac{-d \cdot \sin |b|}{\beta} \right) \right), \quad (1)$$

Это классическая модель однородного, полубесконечного поглощающего слоя с плотностью, экспоненциально распределенной по высоте. Параметр β представляет собой высоту шкалы, а a_0 – поглощение на единицу длины в галактической плоскости. Хотя формула 1 по-прежнему актуальна для отдельных направлений, в [62] предполагались постоянные параметры на сфере, что, очевидно, не соответствует действительности.

В [63] была предложена альтернативная трехмерная аналитическая модель пространственной вариации поглощения A_V в Галактике, которая

описывает поглощение в каждой точке в пределах околоземного пространства, учитывая пылевые слои вдоль галактической плоскости и пояса Гулда. Авторы работы обработали все доступные точные спектральные и фотометрические данные для более чем 42 000 звезд и разработали аналитическую трехмерную модель межзвездного поглощения A_V на расстоянии около 1 кпк от Солнца. Небо было разделено на 199 ячеек по галактическим координатам. В каждой ячейке величина поглощения задавалась формулой:

$$A_V = k_1 \cdot R + k_2 \cdot R^2, \quad (2)$$

где R – расстояние до объекта, а k_1 и k_2 – эмпирически найденные коэффициенты для каждой ячейки в пределах слоя пыли. Вне этого слоя A_V оставалось постоянным и идентичным A_V на краю слоя (в более высоких широтах) или медленно увеличивалось по закону линейной регрессии (в более низких широтах). Были установлены следующие ограничения на A_V : ($A_V < 0.1$) зв.величины для ($|b| \geq 60$), ($A_V < 1.2$) зв.величины для ($45 \leq |b| < 60$), и ($A_V < 3$) зв.величины для ($|b| < 45$).

Однако эта модель не предоставляет физического объяснения для наблюдаемых систематических пространственных изменений A_V . Внутри каждой области неба использовалась только одна функциональная зависимость A_V от расстояния, что делает зависимости в близких областях неба несовместимыми между собой. Это означает, что A_V может существенно различаться в соседних направлениях. Большинство проанализированных звезд относятся к О-Ф звездам главной последовательности в пределах 600 пк от Солнца и близко к плоскости Галактики, что приводит к более низкой точности A_V на больших расстояниях и высоких широтах.

Карта [50] и другие источники показывают, что пыль распределена не только вдоль плоскости Галактики, но и вдоль пояса Гулда, который содержит пылевые облака, области звездообразования, молодые звезды, их ассоциации и скопления, оказывая влияние на глобальную структуру поглощения.

В модели [61] два пылевых слоя пересекаются под углом γ , и их ось пересечения повернута относительно оси Y на угол λ_0 . Слой пояса Гулда имеет конечный радиус R_{limit} и центрирован относительно Солнца. Этот радиус может быть рассчитан как свободный параметр модели или принят как фиксированный (например, $R_{limit} < 600$ пк). Расчет поглощения в поясе ограничен этим радиусом. Внутри каждого слоя поглощение описывается барометрическим законом, зависящим от цилиндрических координат. Свободные параметры модели определяются для разных направлений путем подгонки карт поглощения, как например описано в работах [64; 65].

В работе [29] предлагается альтернативный метод построения эмпирической модели распределения поглощения в Галактике. Авторы работы

вычисляют поглощение A_V , основываясь на данных фотометрии и астрометрии Gaia DR2 и EDR3 и используя данных спектроскопического обзора LAMOST для определения собственных показателей цвета для звезд в выделенных площадках северной части неба. Для определения собственных показателей цвета используется зависимость эффективная температура – собственный показатель цвета. Полученные значения A_V затем аппроксимируются в каждой площадке согласно закону косеканса (1) и для каждой площадки находится пара параметров a_0 и β . Затем значения параметров a_0 и β аппроксимируются сферическими функциями по всей небесной сфере, что обеспечивает согласованность параметров в соседних регионах.

Целью данной работы было определение параметров поглощения межзвездной среды на основе анализа спектроскопических, фотометрических и астрометрических данных различных астрономических обзоров и миссий, а также исследование параметров звезд, включая независимую оценку надежности эффективных температур Gaia DR3 и разработку и апробацию новых методов для поиска и классификации астрономических объектов, в частности, коричневых карликов.

В процессе достижения данной цели в рамках данной работы были решены следующие **задачи**:

- Определение межзвездного поглощения с помощью данных об эффективной температуре из спектроскопических обзоров. Получение значений параметров закона косеканса в различных направлениях по полученным значениям поглощения.
- Разработка и применение цветовых правил для поиска и классификации коричневых карликов в данных фотометрических обзоров, как классическими методами, так и с использованием машинного обучения.
- Создание флагов качества для температур Gaia DR3 модуля GSP-Phot с использованием спектроскопических обзоров высокого разрешения, а также моделей машинного обучения.

Научная новизна: Научная новизна диссертационной работы заключается в использовании новых данных спектроскопических обзоров для вычисления собственных показателей цвета, использовании самой актуальной переписи ближайших коричневых карликов для составления цветовых правил отбора и первом применении алгоритмов машинного обучения к задаче об идентификации коричневых карликов среди объектов других классов, что делает все полученные в ходе работы результаты новыми. Впервые был разработан метод оценки качества эффективных температур, представленных в каталоге Gaia DR3 модуля GSP-Phot, с помощью машинного обучения и получены флаги качества для этих эффективных температур. Подход определения межзвездного поглощения с помощью данных спектроскопических обзоров был распространен на южное небо с использованием данных обзора RAVE.

Теоретическая и практическая значимость.

На данных обзоров RAVE и LAMOST был исследован метод определения поглощения с использованием данных спектроскопических обзоров. Показано, что метод определения собственных показателей цвета с использованием эффективной температуры, предоставленной спектроскопическими обзорами, хорошо согласуется с известными значениями поглощения из литературы. Была показана возможность и перспективы применения моделей машинного обучения к выделению коричневых карликов в фотометрических обзорах WISE, 2MASS и Pan-STARRS. Кроме того, показано, что глубина обзора Gaia недостаточна для полного обнаружения всех коричневых карликов. Показана возможность получения флагов качества для эффективных температур модуля GSP-Phot каталога Gaia с помощью данных спектроскопических обзоров высокого разрешения, а также методов машинного обучения.

В ходе выполнения работы были получены результаты, которые также имеют важную практическую значимость. Были разработаны точные фотометрические правила для отбора коричневых карликов из данных обзоров DES, 2MASS и WISE. Фотометрические правила разработаны для трех семейств коричневых карликов, что позволяет сразу проводить предварительную классификацию между ранними и поздними спектральными классами коричневых карликов. При анализе разработанных моделей машинного обучения было найдено, что коричневые карлики показывают сильные отличия от других спектральных классов в показателе цвета $(i - y)$, а именно: $(i - y) > 1.88$ является более эффективным цветовым правилом отбора для коричневых карликов в сравнении с аналогичными правилами из литературы. В рамках изучения эффективных температур каталога Gaia DR3 GSP-Phot были созданы флаги качества для эффективных температур с помощью моделей машинного обучения, которые позволяют эффективно выделять наиболее качественные значения температур каталога Gaia DR3 GSP-Phot.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в работе задач были использованы статистические методы и методы машинного обучения для классификации и анализа данных. Результаты анализировались с помощью авторского программного обеспечения. Исследование основано на данных современных фотометрических, астрометрических и спектроскопических обзоров, таких как WISE, 2MASS, DES, Gaia DR3, APOGEE, GALAH, LAMOST. Созданные модели прошли верификацию и сравнение с внешними наборами данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе данных спектроскопического обзора RAVE, фотометрических и астрометрических данных каталога Gaia EDR3, а также соотношения эффективной температуры и собственного показателя цвета, для 40 площадок на южном небе была определена

зависимость поглощения от расстояния. С помощью закона косеканса были получены оценки полного галактического поглощения в 36 из 40 площадок.

2. Были разработаны и апробированы фотометрические правила для поиска коричневых карликов в обзорах WISE, 2MASS и DES. По разработанным правилам обнаружено 49 объектов – кандидатов в коричневые карлики.
3. Показана возможность и перспективы применения моделей машинного обучения к выделению коричневых карликов в фотометрических обзорах WISE, 2MASS и Pan-STARRS. Впервые продемонстрировано, что использование показателя цвета, разницы видимого блеска в фильтрах, $(i - y)$ каталога Pan-STARRS перспективно для эффективного выделения коричневых карликов среди других объектов в указанных обзорах.
4. С помощью моделей классического машинного обучения, а именно моделей, реализующих алгоритм бустинга (XGBoost, CatBoost, LightGBM), из полной выборки эффективных температур Gaia GSP-Phot в 471 миллионов объектов были выбраны только объекты с температурами, отклоняющимися от эталонных в пределах 250K. Согласно сделанным оценкам, в каталоге Gaia GSP-Phot около 66% (313 миллионов) объектов обладают надежными оценками эффективной температуры.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием актуальных астрометрических, спектроскопических и фотометрических данных, а также применением хорошо разработанных методов статистического анализа и машинного обучения. Достоверность полученных выводов подтверждается через сопоставление с результатами предыдущих исследований, опубликованных другими авторами.

Апробация работы. Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях:

1. Авдеева А.С., Ковалева Д.А., Малков О.Ю., Некрасов А.Д. “Определение параметров межзвездного поглощения в высоких галактических широтах”, Всероссийская астрономическая конференция, 23 августа – 28 августа 2021, устный доклад, онлайн
2. Авдеева А.С., Ковалева Д.А., Малков О.Ю., Некрасов А.Д. “Процедура аппроксимации для оценки межзвездного поглощения на высоких галактических широтах”, Конференция молодых ученых и специалистов Института астрономии РАН, 16 ноября 2021, устный доклад, онлайн
3. Avdeeva A.S., Kovaleva D.A., Malkov O.Yu. “Combining Gaia, LAMOST and RAVE data for the determination of interstellar

- extinction”, Stellar Spectroscopy and Astrophysical Parameterization from Gaia to Large Spectroscopic Surveys, 21 сентября – 23 сентября 2021, доклад, онлайн
4. Avdeeva A.S., Karpov S.V., Malkov O.Yu. “Cross-matching of high proper motion L, T & Y brown dwarfs with large photometric surveys” Data Analytics and Management In Data Intensive Domains Conference (DAMDID), 4 октября – 7 октября 2022, доклад, Санкт-Петербург, ИТМО
 5. Avdeeva A.S. “Machine learning methods for the search for L&T brown dwarfs in the data of modern sky surveys”, 31 октября – 4 ноября 2022, Astronomical Data Analysis Software and Systems Conference, доклад, онлайн
 6. Авдеева А.С., Карпов С.В., Малков О.Ю. “Поиск коричневых карликов в больших фотометрических обзорах”, Современная звездная астрономия, 8 ноября – 11 ноября 2022, устный доклад, КГО, ГАИШ, Карачаево-Черкесия
 7. Авдеева А.С., Ковалева Д.А., Малков О.Ю. “Независимая проверка оценок эффективной температуры в каталоге Gaia DR3”, Физика звёзд: теория и наблюдения, 26 июня – 30 июня 2023, устный доклад, ГАИШ МГУ, Москва
 8. A. Avdeeva, D. Kovaleva, O. Malkov “Assessing the Reliability of Gaia DR3 Effective Temperatures”, XXV International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, 24 октября – 27 октября 2023, Москва, HSE University

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 5 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Публикации в Web of Science:

1. *Avdeeva A. S., Kovaleva D. A., Malkov O. Y., Zhao G.* Quality flags for GSP-Phot Gaia DR3 astrophysical parameters with machine learning: effective temperatures case study // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2024. — Янв. — Т. 527, № 3. — С. 7382–7393.
2. *Avdeeva A.* Machine learning methods for the search for L&T brown dwarfs in the data of modern sky surveys // Astronomy and Computing. — 2023. — Окт. — Т. 45. — С. 100744.
3. *Avdeeva A. S., Karpov S. V., Malkov O. Y.* Searching for Brown Dwarfs in Large Photometric Surveys: WISE, 2MASS, and DES // Astrophysical Bulletin. — 2023. — Июнь. — Т. 78, № 2. — С. 209–216.
4. *Malkov O. Y., Avdeeva A. S., Kovaleva D. A., Nekrasov A. D.* Interstellar Extinction at High Galactic Latitudes: An Analytical Approximation // Astronomy Reports. — 2022. — Июль. — Т. 66, № 7. — С. 526–534.

5. *Avdeeva A., Kovaleva D., Malkov O., Nekrasov A.* Fitting procedure for estimating interstellar extinction at high galactic latitudes // *Open Astronomy*. — 2021. — Дек. — Т. 30, № 1. — С. 168–175.

Личный вклад.

Работа 2 была опубликована соискателем самостоятельно без соавторов. В работах 1, 3, 4 и 5 автор участвовал в постановке задачи, анализе данных, интерпретации и обсуждении полученных результатов, подготовке публикации. При этом в работе вклад соискателя определяющий и составляет не менее 80%.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет **123** страницы с **33** рисунками и **16** таблицами. Список литературы содержит **99** наименований.

Во **Введении** обсуждается актуальность работы и личный вклад автора, описывается достоверность результатов, их апробация, практическая значимость и методы, использованные для их достижения, сделан обзор литературы по теме диссертации, приведен список публикаций автора, а также выписаны решаемые задачи и выносимые на защиту положения.

В **Главе 1** представлено описание разработки фотометрических правил для поиска коричневых карликов в данных больших фотометрических обзоров методом отбора по цвету. В качестве списка известных коричневых карликов используется список, приведенный в работе [10]. Данный список представляет собой перепись коричневых карликов в ближайших 20 парсеках от Солнца, с известными данными фотометрии в полосах 2MASS и WISE (CatWISE). Производится тщательное кросс-сопоставление коричневых карликов из списка с объектами обзора Pan-STARRS. По найденным сопоставлениям описываются области положения коричневых карликов в пространстве параметров - цветов. По описанию областей затем производится поиск коричневых карликов в пересечении обзоров DES, WISE, 2MASS. Результаты этого поиска анализируются на предмет достоверности. 11 объектов из найденных не обнаруживаются в базе данных SIMBAD, что позволяет сделать вывод о том, что эти коричневые карлики обнаружены впервые.

В **Главе 2** описываются и исследуются модели машинного обучения для решения задачи о поиске коричневых карликов в данных больших фотометрических обзоров. Описано составление набора данных для дальнейшего обучения. Данные об известных коричневых карликах взяты из работы [66], данные об объектах других спектральных классов и классов светимости собраны из открытой базы данных SIMBAD. Четыре модели машинного обучения – случайный лес, XGBoost, метод опорных векторов и

нейронная сеть TabNet – были использованы для двоичной классификации между объектами положительного класса (коричневых карликов) и объектами других спектральных классов и классов светимости. Эффективность моделей сравнивалась с эффективностью фотометрических правил из литературы, использующихся для отбора коричневых карликов по цвету. На данном наборе данных все модели машинного обучения превосходили методы классификации из литературы. Также были проанализированы распределения важности признаков, используемых моделями. Показатели цвета, которые модели считают важными для классификации, в целом сходятся с отмеченными в литературе признаками. Однако в процессе изучения важности признаков моделей было обнаружено, что показатель цвета $(i-y)_{PS1}$ является наиболее перспективным из исследуемых, ранее важность этого признака в литературе не отмечалась.

Глава 3 посвящена созданию флагов качества для эффективных температур Gaia GSP-Phot. В этой главе рассматривается методика и процедура получения флагов качества для эффективных температур с использованием моделей классического машинного обучения. Эффективные температуры Gaia GSP-Phot сравниваются с эффективными температурами обзоров APOGEE/GALAH. Затем модели классического машинного обучения тренируются отличать эффективные температуры Gaia GSP-Phot, которые сходятся с температурами, усредненными между APOGEE и GALAH, от тех, которые отличаются сильно. Рассматриваются два порога качества температур: температуры сходятся в пределах 125 K и 250 K. Модели показали лучшую результативность при установлении порога в 250 K, что может указывать на то, что случайные ошибки в данных эффективных температур Gaia GSP-Phot превосходят порог в 125 K. Результаты были оценены на дополнительных наборах данных, которые модель не видела при обучении. В каждом случае эффективные температуры объектов, выбранных моделями, сходятся в среднем лучше с эталонными температурами, чем эффективные температуры полного набора данных, таким образом, использование флагов качества действительно помогает выбрать более качественные значения температур. Флаги качества также вычислены для всего набора данных Gaia GSP-Phot, по данным моделей качественными являются 66% эффективных температур Gaia GSP-Phot. В главе обсуждаются возможные ограничения данного метода и задачи, требующие дальнейшего исследования.

В Главе 4 приводится эмпирическая модель поглощения излучения, основанная на данных спектроскопического обзора RAVE и фотометрических и астрометрических данных обзора Gaia. Поглощение света в полосе V вычисляется для отдельных объектов в 40 площадках южного неба, в области покрытия обзора RAVE. Внутри каждой площадки полученные поглощения аппроксимируются в зависимости от расстояния законом

косеканса (1), аппроксимация была успешно проведена для 36 из 40 исследуемых площадок. Для 4 оставшихся площадок аппроксимацию не удалось произвести, вероятно, из-за низкого качества данных. Полученные результаты сравниваются с двумерной картой поглощения [67]. Параметры закона косеканса, полученные в 36 площадках, аппроксимируются затем полиномом из сферических функций по всей небесной сфере.

В **Заключении** излагаются итоги выполненного исследования, выводы, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы, а также приводятся **Благодарности**.

Основные выводы

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Были разработаны фотометрические правила для поиска коричневых карликов в обзорах WISE, 2MASS и DES с учетом разделения на три подгруппы, яркие, транзитные и слабые коричневые карлики. Применяя эти правила, мы провели поиск коричневых карликов в области пересечения трех обзоров и обнаружили 135 объектов, удовлетворяющих условиям. Из них 96 объектов были дополнительно исследованы с использованием данных Gaia. Собственные движения этих объектов, рассчитанные по разнице положений в обзорах 2MASS и DES, оказались качественно и количественно согласованными с измерениями Gaia. Было продемонстрировано, что по крайней мере треть коричневых карликов не может быть обнаружена с помощью обзора Gaia. Кроме того, 11 из найденных объектов не обнаруживаются в базе данных SIMBAD, что позволяет сделать вывод о том, что эти коричневые карлики обнаружены впервые.
2. Была исследована возможность и перспективы использования моделей машинного обучения для выделения коричневых карликов в фотометрических обзорах WISE, 2MASS и Pan-STARRS. Для этого был создан обучающий набор данных, включающий коричневые карлики, красные карлики и звезды других спектральных классов. На этом наборе были обучены три модели классического машинного обучения и одна нейронная сеть. Обученные модели на тестовых данных превосходили существующие в литературе методы поиска коричневых карликов, основанные на показателях цвета (точность 0.97-0.98 против 0.935). Это демонстрирует большой потенциал использования методов машинного обучения для решения данной задачи. Исследование также выявило перспективность использования показателя цвета $(i - y)_{PS1}$ для фильтрации коричневых карликов среди других объектов. Было показано, что применение

одного правила $(i - y)_{PS1} > 1.88$ на тестовом наборе данных обеспечивает результативность классификации на уровне 0.968. Этот показатель цвета ранее не рассматривался в литературе для задачи выделения коричневых карликов, что подчеркивает новизну и значимость проведенного исследования.

3. Произведено сравнение оценок эффективных температур из обзора Gaia DR3 модуля GSP-Phot с эффективными температурами из спектроскопических обзоров высокого разрешения, APOGEE и GALAH. Сравнение показало, что, несмотря на то, что для большинства объектов из пересечения Gaia DR3 и APOGEE/GALAH эффективные температуры показывают хорошее согласие, для значительного числа звезд наблюдаются большие отклонения в оценках эффективных температур между оценками Gaia GSP-Phot и спектроскопическими обзорами высокого разрешения. В частности, звезды, близкие к плоскости Галактики, с высокими значениями A0 в Gaia DR3 могут иметь отличие эффективных температур от эталонных до 30 000 K.
4. Обучены несколько моделей классического машинного обучения для выделения из полной выборки эффективных температур Gaia GSP-Phot в 471 миллион объектов только объектов с температурами, совпадающих с эталонными температурами в пределах 250K. По данным моделей в Gaia GSP-Phot порядка 66% (313 миллионов) объектов обладают надежными оценками эффективной температуры. Верификация результатов была проведена с помощью каталогов APOGEE/GALAH, а также на каталоге PASTEL, сборнике атмосферных параметров звезд, полученных из различных спектроскопических исследований высокого разрешения.
5. На южном небе, по данным спектроскопического обзора RAVE, фотометрическим и астрометрическим данным Gaia EDR3 и соотношению эффективная температура - собственный показатель цвета, была исследована зависимость поглощения от расстояния для 40 участков. В 36 из этих участков, с использованием закона косеканса, удалось получить оценки полного галактического поглощения. Сравнение полученных данных с ранее известными оценками позволило сделать вывод о недостаточной точности эффективных температур RAVE для адекватной оценки межзвездного поглощения.

В дальнейшем планируется расширить метод поиска коричневых карликов на оптический обзор Pan-STARRS, поскольку он покрывает примерно в пять раз большую площадь неба, хотя и является менее глубоким. Предполагается также использовать обзоры APOGEE и GALAH, а также планирующиеся обзоры, такие как WEAVE и 4MOST. В настоящее время

также проводится работа по гомогенизации параметров атмосферы, полученных по данным разных обзоров [68], результаты которой также могут оказаться полезными для данной задачи.

Список литературы

1. *Kumar S. S.* The Structure of Stars of Very Low Mass. // The Astrophysical Journal. — 1963. — Т. 137. — С. 1121–1125.
2. *Hayashi C., Nakano T.* Evolution of Stars of Small Masses in the Pre-Main-Sequence Stages // Progress of Theoretical Physics. — 1963. — Т. 30, № 4. — С. 460–474.
3. *Rebolo R., Zapatero Osorio M. R., Martin E. L.* Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster // Nature. — 1995. — Т. 377, № 6545. — С. 129–131.
4. *Nakajima T.* [и др.]. Discovery of a cool brown dwarf // Nature. — 1995. — Т. 378, № 6556. — С. 463–465.
5. *Luhman K. L.* Discovery of a Binary Brown Dwarf at 2 pc from the Sun // The Astrophysical Journal Letter. — 2013. — Т. 767, № 1. — id.L1, 6 pp. — arXiv: [1303.2401](#).
6. *Burningham B.* [и др.]. 76 T dwarfs from the UKIDSS LAS: benchmarks, kinematics and an updated space density // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2013. — Т. 433, № 1. — С. 457–497. — arXiv: [1304.7246](#).
7. *Carnero Rosell A.* [и др.]. Brown dwarf census with the Dark Energy Survey year 3 data and the thin disc scale height of early L types // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — Т. 489, № 4. — С. 5301–5325. — arXiv: [1903.10806](#) [[astro-ph.SR](#)].
8. *Kirkpatrick J. D.* [и др.]. Dwarfs Cooler than “M”: The Definition of Spectral Type “L” Using Discoveries from the 2 Micron All-Sky Survey (2MASS) // The Astrophysical Journal. — 1999. — Т. 519, № 2. — С. 802–833.
9. *Skrzypek N., Warren S. J., Faherty J. K.* VizieR Online Data Catalog: Photometric brown-dwarf classification (Skrzypek+, 2016) // VizieR Online Data Catalog. — 2016. — J/A+A/589/A49.
10. *Kirkpatrick J. D.* [и др.]. The Field Substellar Mass Function Based on the Full-sky 20 pc Census of 525 L, T, and Y Dwarfs // Astrophysical Journal Supplement Series. — 2021. — Т. 253, № 1. — id.7, 85 pp.
11. *Mužić K.* [и др.]. The low-mass content of the massive young star cluster RCW 38 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Т. 471, № 3. — С. 3699–3712. — arXiv: [1707.00277](#) [[astro-ph.SR](#)].

12. *Smith L.* [и др.]. High proper motion objects from the UKIDSS Galactic plane survey // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Т. 443, № 3. — С. 2327–2341. — arXiv: [1406.6698 \[astro-ph.SR\]](#).
13. *Lodieu N.* [и др.]. Binary frequency of planet-host stars at wide separations. A new brown dwarf companion to a planet-host star // Astronomy and Astrophysics. — 2014. — Т. 569. — id.A120, 14 pp. — arXiv: [1408.1208 \[astro-ph.EP\]](#).
14. *Artigau É., Bouchard S., Doyon R., Lafrenière D.* Photometric Variability of the T2.5 Brown Dwarf SIMP J013656.5+093347: Evidence for Evolving Weather Patterns // The Astrophysical Journal. — 2009. — Т. 701. — С. 1534–1539. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3123957>.
15. *Gillon M.* [и др.]. Fast-evolving weather for the coolest of our two new substellar neighbours // Astronomy & Astrophysics. — 2013. — Т. 555. — id.L5, 4 pp. — arXiv: [1304.0481 \[astro-ph.SR\]](#).
16. *Khandrika H.* [и др.]. A Search for Photometric Variability in L- and T-type Brown Dwarf Atmospheres // The Astronomical Journal. — 2013. — Т. 145, № 3. — id.71, 16 pp. — arXiv: [1301.0545 \[astro-ph.SR\]](#).
17. *Marley M. S., Robinson T. D.* On the Cool Side: Modeling the Atmospheres of Brown Dwarfs and Giant Planets // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2015. — Т. 53. — С. 279–323. — arXiv: [1410.6512 \[astro-ph.EP\]](#). — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ARA&A...53..279M>.
18. *Charnay B.* [и др.]. A Self-consistent Cloud Model for Brown Dwarfs and Young Giant Exoplanets: Comparison with Photometric and Spectroscopic Observations // The Astrophysical Journal. — 2018. — Т. 854, № 2. — id.172, 20 pp. — arXiv: [1711.11483](#).
19. *Tremblin P.* [и др.]. Thermo-compositional Diabatic Convection in the Atmospheres of Brown Dwarfs and in Earth’s Atmosphere and Oceans // The Astrophysical Journal. — 2019. — Т. 876, № 2. — id. 144, 13 pp. — arXiv: [1902.03553](#).
20. *Tan X., Showman A. P.* Atmospheric Variability Driven by Radiative Cloud Feedback in Brown Dwarfs and Directly Imaged Extrasolar Giant Planets // The Astrophysical Journal. — 2019. — Т. 874, № 2. — id.111, 18 pp. — arXiv: [1809.06467](#).
21. *Burningham B.* [и др.]. Retrieval of atmospheric properties of cloudy L dwarfs // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Т. 470, № 1. — С. 1177–1197. — arXiv: [1701.01257](#).

22. *Saumon D., Marley M. S.* The Evolution of L and T Dwarfs in Color-Magnitude Diagrams // The Astrophysical Journal. — 2008. — T. 689, № 2. — C. 1327–1344. — arXiv: [0808.2611](#).
23. *Vos J. M.* [и др.]. Astro2020 White Paper: The L/T Transition. — 2019. — eprint: [1903.06691v1](#) (astro-ph.SR).
24. *Maravelias G.* [и др.]. A machine-learning photometric classifier for massive stars in nearby galaxies. I. The method // Astronomy & Astrophysics. — 2022. — T. 666. — id.A122, 26 pp. — arXiv: [2203.08125](#) [[astro-ph.SR](#)].
25. *Pedregosa F.* [и др.]. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. — 2011. — T. 12. — C. 2825–2830.
26. *Mohammadi M., Mutatiina J., Saifollahi T., Bunte K.* Detection of extragalactic Ultra-compact dwarfs and Globular Clusters using Explainable AI techniques // Astronomy and Computing. — 2022. — T. 39. — C. id.100555.
27. *Dréau G., Lebreton Y., Mosser B., Bossini D., Yu J.* Characterising the AGB bump and its potential to constrain mixing processes in stellar interiors // Astronomy & Astrophysics. — 2022. — T. 668. — id.A115, 20 pp. — arXiv: [2207.00571](#) [[astro-ph.SR](#)].
28. *Grunblatt S. K.* [и др.]. Age-dating Red Giant Stars Associated with Galactic Disk and Halo Substructures // The Astrophysical Journal. — 2021. — T. 916, № 2. — id.88, 19 pp. — arXiv: [2105.10505](#) [[astro-ph.SR](#)].
29. *Nekrasov A., Grishin K., Kovaleva D., Malkov O.* Approximate analytical description of the high latitude extinction // European Physical Journal Special Topics. — 2021. — T. 230, № 10. — C. 2193–2205. — arXiv: [2106.03081](#) [[astro-ph.GA](#)].
30. *Sun M., Jiang B., Yuan H., Li J.* The Ultraviolet Extinction Map and Dust Properties at High Galactic Latitude // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2021. — T. 254, № 2. — id.38, 12 pp. — arXiv: [2104.08505](#) [[astro-ph.GA](#)].
31. *Buder S.* [и др.]. The GALAH+ survey: Third data release // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — T. 506, № 1. — C. 150–201. — arXiv: [2011.02505](#).
32. *Jönsson H., Holtzman J. A., al et.* APOGEE Data and Spectral Analysis from SDSS Data Release 16: Seven Years of Observations Including First Results from APOGEE-South // Astronomical Journal. — 2020. — T. 160, № 3. — id.120, 32pp. — arXiv: [2007.05537](#) [[astro-ph.GA](#)].

33. *Abdurro'uf* [и др.]. The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2022. — Т. 259, № 2. — id.35, 39 pp. — arXiv: [2112.02026 \[astro-ph.GA\]](#).
34. *Gilmore G., Randich S., al. et.* The Gaia-ESO Public Spectroscopic Survey // *The Messenger*. — 2012. — Т. 147. — С. 25—31.
35. *Collaboration G.* The Gaia mission // *Astronomy and Astrophysics*. — 2016. — Т. 595. — id.A1, 36 pp. — arXiv: [1609.04153 \[astro-ph.IM\]](#).
36. *Gaia Collaboration* [и др.]. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Т. 674. — id.A1, 22 pp. — arXiv: [2208.00211 \[astro-ph.GA\]](#).
37. *Creevey O. L.* [и др.]. Gaia Data Release 3. Astrophysical parameters inference system (Apsis). I. Methods and content overview // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Т. 674. — id.A26, 35 pp.
38. *Carrasco J. M.* [и др.]. Internal calibration of Gaia BP/RP low-resolution spectra // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Т. 652. — id.A86, 20 pp. — arXiv: [2106.01752 \[astro-ph.IM\]](#).
39. *De Angeli F.* [и др.]. Gaia Data Release 3. Processing and validation of BP/RP low-resolution spectral data // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Т. 674. — id.A2, 28 pp. — arXiv: [2206.06143 \[astro-ph.IM\]](#).
40. *Montegriffo P.* [и др.]. Gaia Data Release 3. External calibration of BP/RP low-resolution spectroscopic data // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Т. 674. — id.A3, 33 pp. — arXiv: [2206.06205 \[astro-ph.IM\]](#).
41. *Andrae R.* [и др.]. Gaia Data Release 3. Analysis of the Gaia BP/RP spectra using the General Stellar Parameterizer from Photometry // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Июнь. — Т. 674. — id.A27, 22 pp. — arXiv: [2206.06138 \[astro-ph.SR\]](#).
42. *Gustafsson B.* [и др.]. A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. I. Methods and general properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — Т. 486, № 3. — С. 951—970. — arXiv: [0805.0554 \[astro-ph\]](#).
43. *Brott I., Hauschildt P. H.* A PHOENIX Model Atmosphere Grid for Gaia // *The Three-Dimensional Universe with Gaia*. Т. 576 / под ред. C. Turon, K. S. O'Flaherty, M. A. C. Perryman. — 2005. — С. 565—568. — (ESA Special Publication). — arXiv: [astro-ph/0503395 \[astro-ph\]](#).
44. *Lanz T., Hubeny I.* A Grid of Non-LTE Line-blanketed Model Atmospheres of O-Type Stars // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2003. — Т. 146, № 2. — С. 417—441. — arXiv: [astro-ph/0210157 \[astro-ph\]](#).

45. *Lanz T., Hubeny I.* A Grid of NLTE Line-blanketed Model Atmospheres of Early B-Type Stars // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2007. — T. 169, № 1. — C. 83–104. — arXiv: [astro-ph/0611891](#) [[astro-ph](#)].
46. *Borisov S. B.* [и др.]. New Generation Stellar Spectral Libraries in the Optical and Near-infrared. I. The Recalibrated UVES-POP Library for Stellar Population Synthesis // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2023. — T. 266, № 1. — id.11, 20 pp. — arXiv: [2211.09130](#) [[astro-ph.IM](#)].
47. *Brandner W., Calissendorff P., Kopytova T.* Benchmarking Gaia DR3 Apsis with the Hyades and Pleiades open clusters // Astronomy & Astrophysics. — 2023. — T. 677. — id.A162, 8 pp. — arXiv: [2306.03132](#) [[astro-ph.SR](#)].
48. *Andrae R., Rix H.-W., Chandra V.* Robust Data-driven Metallicities for 175 Million Stars from Gaia XP Spectra // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2023. — T. 267, № 1. — id.8, 15 pp. — arXiv: [2302.02611](#) [[astro-ph.SR](#)].
49. *Zhang X., Green G. M., Rix H.-W.* Parameters of 220 million stars from Gaia BP/RP spectra // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — T. 524, № 2. — C. 1855–1884. — arXiv: [2303.03420](#) [[astro-ph.SR](#)].
50. *Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M.* Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds // The Astrophysical Journal. — 1998. — T. 500, № 2. — C. 525–553. — arXiv: [astro-ph/9710327](#) [[astro-ph](#)].
51. *Marshall D. J., Robin A. C., Reylé C., Schultheis M., Picaud S.* Modelling the Galactic interstellar extinction distribution in three dimensions // Astronomy & Astrophysics. — 2006. — T. 453, № 2. — C. 635–651.
52. *Sale S. E.* [и др.]. A 3D extinction map of the northern Galactic plane based on IPHAS photometry // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — T. 443, № 4. — C. 2907–2922.
53. *Green G. M., Schlafly E., Zucker C., Speagle J. S., Finkbeiner D. A.* 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS // The Astrophysical Journal. — 2019. — T. 887, № 1. — id.93, 27pp. — arXiv: [1905.02734](#) [[astro-ph.GA](#)].
54. *Lallement R.* [и др.]. 3D maps of the local ISM from inversion of individual color excess measurements // Astronomy & Astrophysics. — 2014. — T. 561. — id.A91, 17 pp.

55. *Vergely J., Valette B., Lallement R., Raimond S.* Spatial distribution of interstellar dust in the Sun's vicinity. Comparison with neutral sodium-bearing gas // *Astronomy & Astrophysics*. — 2010. — T. 518. — id.A31, 12 pp. — arXiv: [1002.4578 \[astro-ph.GA\]](#).
56. *Cramer N.* Calibrations for B-type stars in the Geneva photometric system // *New Astronomy Reviews*. — 1999. — T. 43, № 5. — C. 343–387.
57. *Nordström B.* [и др.]. The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighbourhood. Ages, metallicities, and kinematic properties of ~14 000 F and G dwarfs // *Astronomy & Astrophysics*. — 2004. — T. 418. — C. 989–1019. — arXiv: [astro-ph/0405198 \[astro-ph\]](#).
58. *Casagrande L.* [и др.]. New constraints on the chemical evolution of the solar neighbourhood and Galactic disc(s). Improved astrophysical parameters for the Geneva-Copenhagen Survey // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — T. 530. — id.A138, 21 pp. — arXiv: [1103.4651 \[astro-ph.GA\]](#).
59. *Lallement R.* [и др.]. Gaia-2MASS 3D maps of Galactic interstellar dust within 3 kpc // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — T. 625. — id.A135, 16 pp.
60. *Chen B.-Q.* [и др.]. A three-dimensional extinction map of the Galactic anticentre from multiband photometry // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — T. 443, № 2. — C. 1192–1210.
61. *Gontcharov G. A.* Influence of the Gould belt on interstellar extinction // *Astronomy Letters*. — 2009. — T. 35, № 11. — C. 780–790. — arXiv: [1606.09624 \[astro-ph.SR\]](#).
62. *Parenago P. P.* On interstellar extinction of light // *Astron. Zh.* — 1940. — T. 13. — C. 3.
63. *Arenou F., Grenon M., Gomez A.* 16. A tridimensional model of the galactic interstellar extinction. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1992. — T. 258. — C. 104–111.
64. *Gontcharov G. A., Mosenkov A. V.* Gaia DR2 giants in the Galactic dust - I. Reddening across the whole dust layer and some properties of the giant clump // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — T. 500, № 2. — C. 2590–2606. — arXiv: [2011.11113 \[astro-ph.GA\]](#).
65. *Gontcharov G. A., Mosenkov A. V.* Gaia DR2 giants in the Galactic dust - II. Application of the reddening maps and models // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — T. 500, № 2. — C. 2607–2619. — arXiv: [2011.13811 \[astro-ph.GA\]](#).

- 66. *Best W. M. J.* [и др.]. Photometry and Proper Motions of M, L, and T Dwarfs from the Pan-STARRS1 3π Survey // Astrophysical Journal Supplement Series. — 2018. — T. 234, № 1. — id.1, 37 pp. — arXiv: [1701.00490](#).
- 67. *Schlafly E. F., Finkbeiner D. P.* Measuring reddening with Sloan Digital Sky Survey stellar spectra and recalibrating SFD. // The Astrophysical Journal. — 2011. — T. 737, № 2. — id.103, 13 pp.
- 68. *Tsantaki M.* [и др.]. Survey of Surveys. I. The largest compilation of radial velocities for the Galaxy // Astronomy & Astrophysics. — 2022. — T. 659. — id.A95, 24 pp. — eprint: [2110.09316](#) (astro-ph.GA).