

На правах рукописи



**Селезнев Антон Федорович**

**ИССЛЕДОВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ, СТРУКТУРЫ И  
ДИНАМИКИ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук **Бобылев Вадим Вадимович**, заведующий лабораторией динамики Галактики ФГБУН Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН);

доктор физико-математических наук, доцент **Глушкова Елена Вячеславовна**, доцент кафедры астрофизики и звёздной астрономии ФГБОУ ВО "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова";

доктор физико-математических наук, профессор **Марсаков Владимир Андреевич**, ведущий научный сотрудник НИИ физики ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет".

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «21» февраля 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской Академии Наук по адресу: 119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института астрономии РАН и на сайте [http://www.inasan.ru/scientific\\_activities/diss\\_council/diss/](http://www.inasan.ru/scientific_activities/diss_council/diss/).

Автореферат разослан «10» декабря 2021 г.  
Телефон для справок: +7 (495) 951-54-61

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.280.01,  
кандидат физ.-мат. наук

Чупина Наталия Викторовна

# 1 Общая характеристика работы

## Актуальность работы

За последние 30 лет в исследовании звездных скоплений было получено очень много нового, что значительно расширило и изменило наши представления как о самих скоплениях, так и о нашей Галактике, и о ближайших галактиках [1].

Очень населенные молодые скопления с массами, как у шаровых скоплений, и возрастами, как у рассеянных скоплений, были обнаружены вначале в Магеллановых Облаках (ближайших спутниках нашей Галактики). Среди скоплений Магеллановых Облаков особо выделяется скопление NGC 2070, ионизирующее туманность Тарантул, центр самой крупной и активной области звездообразования в Местной группе галактик [2]. Примечательно, что природу центрального объекта в скоплении NGC 2070, R136a, удалось объяснить только тогда, когда его удалось разрешить на отдельные звезды. Оказалось, что это ядро звездного скопления, содержащее большое количество звезд спектрального класса O и звезд типа WR [3].

Благодаря значительному развитию техники наблюдений в инфракрасном диапазоне (ИК), такие скопления открыты сейчас и в нашей Галактике [4]. В первую очередь, это скопления в окрестности центра Галактики — скопления Quintuplet (смотри, например, [5]) и Arches (смотри, например, [6]). Многие скопления попали в список массивных скоплений за последнее десятилетие. Часть из них уже были известны, но их массы были пересмотрены в большую сторону. Это скопления Westerlund 1 и Westerlund 2, Trumpler 14, NGC 3603. Недалеко от области звездообразования W43 были обнаружены скопления RSGC 1, 2, 3 и 4 (RSGC = Red Super Giant Cluster), они имеют возрасты в диапазоне 10–20 миллионов лет и оценки массы в интервале  $M_{cl} = (2 - 5) \cdot 10^4 M_{\odot}$ .

В последние двадцать лет возобновился интерес к шаровым скоплениям (ШС) Галактики. Оказалось, что они являются намного более сложными и интригующими объектами, чем считались в прошлом. Основная причина заключается в том, что спектроскопические, а позже и фотометрические наблюдения показали, что в шаровых скоплениях имеется несколько населений (или поколений) звезд разного возраста. Недавние обзоры можно найти, например, в [7, 8, 9].

В последние годы открылось новое направление исследований - изучение центральных (ядерных) скоплений галактик. Основное внимание, конечно, уделяется Центральному скоплению нашей Галактики [10] и ближайших га-

лактик. К числу основных особенностей этих скоплений относится то, что они включают населения звезд с очень большим разбросом возрастов. Это наиболее плотные звездные скопления во Вселенной, в их центрах плотность достигает  $10^7$  пк $^{-3}$ . С точки зрения динамики, это тоже уникальные скопления, так как они, как правило, включают в себя сверхмассивную черную дыру. Существует два сценария формирования центральных скоплений галактик. Первый заключается в том, что звезды таких скоплений формируются на месте в центре галактики из вещества молекулярных облаков, падающих на центр. Вторым сценарием является то, что центральные скопления формируются из звездных скоплений, падающих на центр галактики в результате динамического трения. Не исключено, что могут работать оба этих сценария [11].

Значительное внимание в последние годы уделяется изучению систем звездных скоплений (в первую очередь, шаровых скоплений) других галактик. Эти исследования должны помочь пониманию процесса формирования шаровых скоплений [12].

Благодаря обзорам неба, проведенным в инфракрасном диапазоне, появилась возможность изучать области с очень большим поглощением, в том числе и области звездообразования. Эти обзоры дали начало новой волне интереса к открытию новых и исследованию уже известных рассеянных скоплений. Многие из этих скоплений — это звездные группы, все еще погруженные в свои родительские облака и находящиеся на самой ранней стадии эволюции. В связи с этим появился новый термин — «погруженные скопления» ('embedded clusters'). Исследование погруженных скоплений дает богатейшую информацию для теории звездообразования (см., например, [13, 14]).

Активность исследования звездных скоплений Галактики, особенно рассеянных звездных скоплений (РЗС), в самые последние годы значительно выросла благодаря успешной работе космической миссии Gaia [15]. В 2018 году появился каталог Gaia DR2 [16], содержащий высокоточные координаты, тригонометрические параллаксы, собственные движения и результаты фотометрии для примерно 1.3 миллиарда звезд. В 2021 году появился каталог Gaia EDR3 [17], содержащий астрометрические и фотометрические данные для 1.8 миллиарда звезд. Эти данные позволяют исследовать трехмерную структуру и, ограниченно (из-за недостатка данных о лучевых скоростях), трехмерное поле скоростей в ближайших рассеянных скоплениях.

Еще одно направление исследований с использованием каталогов Gaia — это выделение движущихся скоплений и других гравитационно-несвязанных структур, которые могут иметь общее происхождение с областями звездо-

образования или известными рассеянными скоплениями. Так, в работе Жерабковой с соавторами [18] была обнаружена реликтовая волокно-подобная структура из звезд в области звездообразования в Орионе, связанная, по мнению авторов, с первым этапом звездообразования в этой области. Звездное волокно было также обнаружено в области Vela OB2 [19]. Это волокно включает в себя рассеянные скопления NGC 2547, NGC 2451B, Collinder 132 и несколько вновь открытых скоплений.

В данной диссертационной работе соискателем был поставлен ряд целей, достижение которых позволяет углубить наше понимание структуры звездных скоплений, их динамической эволюции и звездного состава. Также, целями работы было определить фундаментальные характеристики для ряда малоизученных рассеянных звездных скоплений и исследовать их структуру, исследовать свойства Галактического диска по данным фотометрии в полях специально отобранных РЗС, выяснить особенности формирования звездных скоплений на примере области звездообразования G174+2.5.

### **Цели диссертационной работы.**

1. Определить фундаментальные характеристики (возраст, гелиоцентрическое расстояние, избыток цвета) для мало изученных рассеянных звездных скоплений; получить оценки их размеров и количества звезд в них.
2. Получить новые данные о коронах звездных скоплений на основе архивных наблюдательных данных. Определить динамические причины формирования долгоживущих корон рассеянных скоплений и их динамические свойства на основе анализа результатов численных экспериментов в рамках задачи  $N$  тел.
3. Выявить различия в пространственном распределении звезд различных населений в шаровом скоплении  $\omega$  Cen.
4. Установить наиболее вероятный механизм формирования звезд голубых бродяг в шаровом скоплении Arg 2.
5. Исследовать возможность изучения крупномасштабной структуры диска Галактики по данным фотометрии в площадках рассеянных звездных скоплений. Получить свидетельства об искривлении и расширении диска Галактики.
6. Определить свойства поля скоростей, получить структурные характеристики и характеристики звездного состава ближайших к Солнцу рассеянных скоплений по данным Gaia DR2.

7. Разработать новый подход к исследованию структуры и населения звездных скоплений на основе метода KDE, в том числе к получению функции светимости и функции масс звездных скоплений, оценок массы звездных скоплений.
8. Получить поправочные коэффициенты к массе звездного скопления, определенной по его функции светимости, учитывающие наличие в скоплении неразрешенных двойных и кратных систем.
9. Исследовать особенности формирования звездных скоплений в областях звездообразования.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Впервые проведено детальное исследование 25 мало изученных рассеянных скоплений. Получены их структурные и фотометрические характеристики (радиусы, гелиоцентрические расстояния, избытки цвета, возрасты).
2. Показано, что крупномасштабную структуру диска Галактики можно изучать по данным фотометрии в полях рассеянных звездных скоплений. Исследовано искривление и расширение диска Галактики в направлении третьего галактического квадранта.
3. Подтверждено существование протяженных корон рассеянных звездных скоплений. Исследована эволюция распределения звездной плотности в численных моделях корон рассеянных звездных скоплений; с этой целью были получены формулы для построения радиального профиля пространственной плотности методом KDE. Исследована динамика корон численных моделей скоплений, выяснена причина формирования корон скоплений: существование периодических орбит звезд с энергиями больше критической и периодами, сравнимыми с временем жизни скоплений, и большого числа близких к таким орбитам обратных незамкнутых траекторий звезд.
4. Показано, что функцией Кинга нельзя описывать распределение поверхностной плотности звезд во внешних областях рассеянных звездных скоплений. Необходимо использовать комбинированную функцию, состоящую из функции Кинга для области ядра скопления и функции плотности пространственно-однородной короны.

5. Создан новый Атлас звездных скоплений Галактики на основе данных о положениях и размерах 3291 скопления. Онлайн-версия атласа предназначена для отождествления скоплений в площадках произвольного размера.
6. Обнаружены приливные хвосты Rup 147 и Альфа Персея, получена выборка вероятных членов скопления Плеяды и исследована его кинематика и динамика, определены структура и возраст звездного потока в окрестности скопления Альфа Персея. Предложен метод оценки вероятности принадлежности группы звезд к скоплению («метод равномерного фона»).
7. Выявлены различия в распределении звезд разных населений в шаровом скоплении Омега Центавра (ортогональность больших полуосей эллипсов, аппроксимирующих изолинии поверхностной плотности, и более сильная концентрация звезд населения богатого металлами к центру скопления), свидетельствующие о том, что это скопление было ядерным скоплением карликовой галактики, аккрецированной Млечным Путем. Показано, что наиболее вероятным механизмом образования голубых бродяг в шаровом скоплении Agr 2 является эволюция первичных двойных систем.
8. Обнаружено, что гало экстремально молодого звездного скопления NGC 2070 в Большом Магеллановом Облаке состоит из большого числа подгрупп, совпадающих с волокнами туманности Тарантул и имеющих форму дуг или оболочек. Исследовано распределение погруженных скоплений в области звездообразования G174+2.5, обнаружено неизвестное ранее скопление S232IR, расположенное на западной стороне области ионизованного водорода Sh2-232.
9. Показано, что из-за наличия неразрешенных двойных и кратных систем в звездном скоплении оценка его массы, получаемая по функции светимости, будет занижена. Предложен метод «составления пары с ограничением по светимости» для определения масс компонент неразрешенной кратной системы. Получены поправочные коэффициенты к оценке массы скопления в зависимости от доли неразрешенных двойных и кратных звезд и вида распределения отношения масс их компонент.

### **Научная новизна.**

Впервые проведено подробное исследование 25 мало изученных РЗС. Показано, что 5 из них, скорее всего, не являются звездными скоплениями, а

представляют собой группы звезд, случайно оказавшихся рядом в проекции на небесную сферу. Получены свидетельства искривления и расширения диска Галактики на больших расстояниях от Солнца по данным фотометрии в полях рассеянных скоплений.

На основе данных каталога Gaia DR2 проведено исследование близких рассеянных скоплений Плеяды, Альфа Персея и Ruprecht 147, в результате которого были получены новые данные о структуре, кинематике и динамике этих скоплений. В частности, показано, что ядро скопления Плеяды гравитационно неустойчиво и обладает вращением в «прямом» направлении. Выяснена структура звездного потока, связанного со скоплением Альфа Персея; показано, что поток имеет возраст около 5 миллиардов лет, обладает заметным населением белых карликов и расположен в среднем в 90 парсеках дальше скопления. Обнаружены приливные хвосты скоплений Ruprecht 147 и Альфа Персея.

Предложен «метод равномерного фона» для оценки вероятности принадлежности группы звезд к скоплению. Получена выборка вероятных членов скопления Плеяды, существенно полная (10% потерянных звезд) и существенно «чистая» (5% звезд поля).

Подтверждено существование протяженных корон рассеянных звездных скоплений. Рассмотрена динамика корон рассеянных звездных скоплений и выяснена причина их формирования: существование периодических орбит звезд с энергиями больше критической и периодами, сравнимыми с временем жизни скоплений, и большого числа близких к таким орбитам обратных незамкнутых траекторий звезд.

Разработан комплексный подход к определению параметров звездных скоплений методом KDE. Отработана методика получения функций блеска (функций светимости) и функций масс звездных скоплений, показаны преимущества метода KDE перед методом гистограмм.

Для рассеянного скопления NGC 4337 проведено сравнение оценок массы по его функции блеска (фотометрическая оценка) и по дисперсии скоростей, полученной по данным о лучевых скоростях звезд вероятных членов скопления (динамическая оценка). Показано, что динамическая оценка в несколько раз больше фотометрической оценки массы. Выдвинуто предположение о том, что значение дисперсии скоростей завышено, и одна из возможных причин — это наличие неразрешенных двойных звезд в выборке.

Исследовано влияние неразрешенных кратных звезд на фотометрическую оценку массы скопления. Получены поправочные коэффициенты к массе скопления, найденной в предположении, что все звезды в скоплении одиночные. С



этой целью предложен метод «составления пары с ограничением по светимости» ('luminosity-limited pairing') и доказано, что именно этот метод должен использоваться при уточнении массы скопления за счет наличия неразрешенных кратных звезд.

Впервые показано существование значимых различий в пространственном распределении звезд разных населений в шаровом скоплении  $\omega$  Cen.

Получены аргументы в пользу того, что голубые бродяги в шаровом скоплении Arg 2 образовались в результате переноса вещества между компонентами первичных тесных двойных систем в скоплении.

Впервые обнаружена и исследована сложная структура гало звездного скопления NGC 2070 в Большом Магеллановом облаке.

Обнаружено новое, не известное ранее звездное скопление S232IR в области звездообразования G174+2.5.

Полученные в диссертации результаты важны для понимания процессов, происходящих в звездных скоплениях, а также для понимания «экологии» подсистемы рассеянных звездных скоплений в диске Галактики. Основные результаты используются для сравнения теоретических исследований динамики звездных скоплений с полученными наблюдательными данными.

### **Научная и практическая значимость.**

За последние 20 лет, благодаря развитию техники инфракрасных наблюдений и появлению больших фотометрических и спектроскопических обзоров, представления о звездных скоплениях существенным образом изменились. В Галактике были обнаружены молодые населенные скопления. Оказалось, что шаровые скопления содержат несколько населений звезд разного химсостава и возраста. Значительно увеличилось количество известных рассеянных скоплений. Были открыты «погруженные» скопления — скопления на самой ранней стадии формирования. Открыты и активно изучаются «центральные» («ядерные») звездные скопления в ядрах галактик. Интерес к звездным скоплениям особенно усилился в связи с успешной работой космической миссии Gaia, что привело к значительному увеличению числа публикаций по этой тематике.

Изучение звездных скоплений имеет большое значение для астрономии в целом и для астрофизики в частности. Изучение «погруженных» скоплений дает ключ к пониманию процессов звездообразования. Диаграммы «звездная величина–показатель цвета» скоплений являются основным «пробным камнем» для теории звездной эволюции. Изучение скоплений дает возможность делать выводы о структуре и кинематике Галактики, о ее динамической и хи-

мической эволюции. Звездные скопления содержат уникальные астрофизические объекты («голубые бродяги», миллисекундные пульсары, катаклизмические переменные звезды). Звездные скопления позволяют исследовать гравитационное взаимодействие многих тел на самых разных масштабах. Таким образом, звездные скопления представляют собой уникальные лаборатории по изучению астрофизики, звездной динамики и фундаментальной физики.

Представленная работа включает в себя исследования по многим из перечисленных выше направлений. Разработанные автором методы, программное обеспечение могут применяться другими исследователями в этой области звездной астрономии. Полученные результаты (выборки звезд, списки скоплений и их характеристики) способны стать отправной точкой для новых исследований. Выводы о существовании протяженных корон рассеянных скоплений и о причинах их формирования могут использоваться для дальнейшего развития теоретических представлений о динамике звездных скоплений.

### **Методология и методы исследования**

Задачи диссертации решались при помощи анализа архивных наблюдательных данных (обзор неба в инфракрасном диапазоне 2MASS, каталог Gaia DR2), а также оригинальных наблюдательных данных по фотометрии и спектроскопии в полях звездных скоплений, полученных соавторами соискателя. Данные загружались из соответствующих каталогов и анализировались при помощи авторского программного обеспечения, написанного на языке программирования FORTRAN, а также различных специализированных пакетов программ (например, Aladin, TopCat и других). Для получения и анализа функций распределения, характеризующих скопление, соискатель широко использует метод Kernel Density Estimator (KDE).

### **Достоверность представленных результатов**

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов исследования структуры, звездного состава и динамики звездных скоплений подтверждается сравнением с теоретическими и наблюдательными данными других авторов и обсуждением полученных результатов на конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в ведущих мировых рецензируемых журналах.

**Апробация работы.** Результаты по теме диссертации докладывались на объединенном семинаре кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды и Коуровской астрономической обсерватории УрФУ, на всероссийских и международных конференциях.

1. Всероссийская конференция по звездной динамике и небесной механике, Косалма, Карелия, Россия, 15–18 июня 1993 г.
2. 24-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 30 января – 03 февраля 1995 г.
3. Международная конференция “Structure and Evolution of Stellar Systems”, г. Петрозаводск, Карелия, Россия, 13–17 августа 1995 г.
4. JENAM-2000, 9-th European and 5-th Euro-Asian Astronomical Society Conference, г. Москва, Россия, 29 мая – 3 июня 2000 г.
5. 30-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 29 января – 02 февраля 2001 г.
6. Международная конференция “New horizons in globular cluster astronomy”, г. Падуя, Италия, 24–28 июня 2002 г.
7. 39-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 01–05 февраля 2010 г.
8. 40-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 31 января – 04 февраля 2011 г.
9. 41-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 30 января – 03 февраля 2012 г.
10. Всероссийская конференция “Современная звездная астрономия 2013”, г. Санкт-Петербург, Россия, 10–12 июня 2013 г.
11. 44-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 02–06 февраля 2015 г.
12. 45-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 01–05 февраля 2016 г.
13. Международная конференция “COSMIC-LAB: Star Clusters as Cosmic Laboratories for Astrophysics, Dynamics and Fundamental Physics” (MODEST 16), г. Болонья, Италия, 18–22 апреля 2016 г.
14. Всероссийская конференция “Современная звездная астрономия 2016”, г. Кисловодск, Россия, 08–10 июня 2016 г.
15. Международная конференция “Stellar aggregates over mass and spatial scales”, г. Бад-Хоннеф, Германия, 05–09 декабря 2016 г.

16. 46-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 30 января – 03 февраля 2017 г.
17. Всероссийская конференция “Современная звездная астрономия 2017”, г. Екатеринбург, Россия, 14–16 июня 2017 г.
18. Международная конференция MODEST 17 “Under Prague’s Starry Skies”, г. Прага, Чешская республика, 18–22 сентября 2017 г.
19. 47-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 29 января – 02 февраля 2018 г.
20. Совещание международной рабочей группы “Open cluster study with Gaia data”, г. Брно, Чешская республика, 08–10 июня 2018 г.
21. Всероссийская конференция “Современная звездная астрономия 2018”, г. Москва, Россия, 22–26 октября 2018 г.
22. 48-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 28 января – 01 февраля 2019 г.
23. IAU Symposium No. 351, MODEST 19 “Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe”, г. Болонья, Италия, 27–31 мая 2019 г.
24. Всероссийская конференция “Современная звездная астрономия 2019”, п. Нижний Архыз, Россия, 07–11 октября 2019 г.
25. 49-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 27–31 января 2020 г.
26. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых «Астрономия и исследование космического пространства», г. Екатеринбург, Россия, 1–5 февраля 2021 г.

### **Личный вклад автора**

Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач. Им разработано оригинальное программное обеспечение для анализа наблюдательных данных, проведено необходимое тестирование. Соискателем выполнены расчеты, проанализированы полученные результаты, сформулированы выводы. В необходимых случаях, вклад соискателя конкретизируется при описании отдельных полученных результатов.

В частности, соискателем:

1. Показано, что большие полуоси эллипсов, аппроксимирующих изолинии поверхностной плотности распределения звезд разных населений в скоплении  $\omega$  Cen, ортогональны в центральной части скопления.
2. Обнаружена более сильная концентрация звезд населения богатого металлами к центру скопления  $\omega$  Cen по сравнению с малометаллическими звездами.
3. Исследована эволюция распределения звездной плотности в численных моделях корон рассеянных звездных скоплений; с этой целью были получены формулы для построения радиального профиля пространственной плотности методом KDE.
4. Разработана новая методика для оценки радиуса скопления по радиальному профилю плотности, позволяющая минимизировать субъективный фактор и обеспечивающая более высокую точность, чем другие методики.
5. Разработана методика для определения центра скопления с помощью линейной плотности, полученной методом KDE. При этом показано, что центр скопления в значительной степени условное понятие и что положение центра различается для звезд разных населений, разной звездной величины.
6. Разработан метод оценки вероятности принадлежности группы звезд к скоплению («метод равномерного фона»).
7. Разработан метод определения массы компонент неразрешенной двойной системы по ее светимости (метод «составления пары с ограничением по светимости»; ‘luminosity-limited pairing’).
8. Разработан комплексный подход к определению параметров звездных скоплений методом KDE.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация объемом 318 с. состоит из пяти глав, введения, заключения и списка литературы, содержащего 299 названий. Число рисунков — 81, таблиц — 23.

## 2 Содержание работы

**Введение** содержит постановку задачи и ее обоснование (*актуальность, новизна, научное и практическое значение*), краткое изложение содержания, выносимые на защиту результаты, а также перечень основных публикаций и конференций, симпозиумов, семинаров, где докладывались результаты диссертации.

**Первая глава** «*Фотометрия и звездные подсчеты в областях малоизученных рассеянных звездных скоплений*».

Описана методика построения радиальных профилей плотности звездных скоплений через дифференцирование полинома наилучшего среднеквадратичного приближения для функции  $N(r)$  (числа звезд в пределах круга радиуса  $r$ ) [A1]. Рассмотрено применение метода KDE для получения распределений поверхностной плотности числа звезд и радиальных профилей поверхностной и пространственной плотности. Получены формулы для вклада звезды в пространственную плотность числа звезд в случае, когда известны прямоугольные координаты звезд [A15]. Показано, что при исследовании звездных скоплений значительная роль принадлежит определению их структурных характеристик, в первую очередь получению карты поверхностной плотности и радиального профиля поверхностной плотности.

На основе оригинальных фотометрических данных и звездных подсчетов проведено исследование большого количества рассеянных звездных скоплений [A10, A12, A14, A17, A18]. Часть этих скоплений уже исследовались ранее (Lynga 6, NGC 2215, 4337, Tr 22), часть скоплений была подробно исследована впервые (Czernik 38; Haffner 22; Hogg 19, 21; IC 2714; Lynga 4, 12; NGC 2354, 4052, 5316, 5715, 6268; Pismis 10; Ruprecht 11, 128; Trumpler 13, 20, 25, 26, 34). Было показано, что объекты ESO 131 SC09, ESO 489 SC01, NGC 5284, Pismis 14 и VdB-Hagen 164, скорее всего, не являются звездными скоплениями, а представляют собой группы звезд, случайно оказавшихся рядом в проекции на небесную сферу.

В этих работах были получены структурные характеристики скоплений (что было, скорее, вспомогательной задачей) и их фундаментальные характеристики (гелиоцентрическое расстояние, покраснение, возраст), основанные на исследовании фотометрических диаграмм. При этом, именно комплексный подход к исследованию скоплений позволил добиться успеха. В качестве характерного примера можно упомянуть рассеянное скопление Hogg 19, где карты плотности, построенные для разных интервалов предельных величин, позволили разделить звездные населения в исследуемой площадке и

определить фундаментальные характеристики скопления. В ходе проведения этих исследований было продемонстрировано преимущество индивидуального, комплексного подхода к исследованию звездных скоплений перед полуавтоматическими методами определения их параметров [A18].

Также, представлены результаты исследования структуры Галактического диска, а именно его искривления и расширения на больших расстояниях от Солнца на основе фотометрического исследования в полях специально отобранных РЗС [A14]. Скопления были специально подобраны таким образом, чтобы направление луча зрения пересекало изогнутый диск Галактики на разных галактических широтах и долготах, образуя разрез. Молодое и старое население в полях разных скоплений на диаграмме «звездная величина–показатель цвета» показывает узор, критически зависящий от вертикального положения тонкого и/или толстого диска Галактики, и от того, пересекает ли луч зрения оба эти диска, один или ни одного.

**Вторая глава** *«Профили плотности, короны и близкие окрестности звездных скоплений»*.

В разделе 2.1 представлены результаты исследования радиальных профилей плотности нескольких РЗС на основе данных Каталога точечных источников 2MASS, подтверждающие наличие протяженных корон скоплений [A15]. Показано, что в литературе очень часто приводятся заниженные значения радиусов рассеянных скоплений. Обсуждаются функции, аппроксимирующие профили плотности РЗС. Показано, что функция Кинга плохо описывает распределение поверхностной плотности звезд во внешних областях рассеянных звездных скоплений. Гораздо лучше это распределение описывается комбинированной функцией, состоящей из функции Кинга для области ядра скопления и функции плотности пространственно-однородной короны.

В разделе 2.2 подробно рассмотрен вопрос об исследованиях трехмерной структуры и трехмерного поля скоростей РЗС на основе данных Gaia и показано, что такую задачу можно будет решить только для относительно небольшого числа ближайших к Солнцу скоплений с гелиоцентрическими расстояниями до 200 пк. В работе [A23] были сформулированы два подхода к исследованию РЗС на основе каталогов Gaia.

Первый подход («детальный») предполагает выделение вероятных членов скопления, имеющих максимальную точность определения астрометрических параметров (тригонометрических параллаксов и собственных движений). Такой подход позволяет исследовать внутреннюю структуру, кинематику и динамику скопления, выделять слабо населенные области в его ближайших окрестностях (например, приливные хвосты). Но необходимо осознавать, что

при таком подходе теряется значительная часть членов скопления (имеющих большие ошибки определения параметров). Поэтому, выводы о свойствах функций распределения, характеризующих скопление, при таком подходе будет делать трудно.

Второй подход («статистический») подразумевает выделение относительно широких интервалов астрометрических параметров звезд, в которых располагаются практически все члены скопления. При таком подходе возможно использование различных статистических методов, позволяющих построить различные функции распределения для скопления (функцию поверхностной плотности, функцию блеска (светимости), функцию масс). Проведение отбора звезд при таком подходе тоже необходимо, так как он позволяет значительно уменьшить число звезд поля в выборке и, соответственно, значительно уменьшить крупномасштабные флуктуации в функциях распределения звезд поля.

В разделе 2.3 оба этих подхода применены к исследованию старого рассеянного скопления Ruprecht 147 [A20]. Использование тщательно отобранных членов скопления Ruprecht 147 в количестве 69 звезд позволило обнаружить приливные хвосты скопления. В рамках статистического подхода были получены функция светимости и функция масс, а также оценки числа звезд в скоплении  $280 \pm 67$  (в 4 раза больше, чем попало в выборку членов скопления при тщательном их отборе) и массы скопления  $234 \pm 52$  массы Солнца. Был сделан вывод о том, что скопление находится в стадии активного разрушения.

Раздел 2.4 посвящен исследованию скопления Плеяды [A23]. Для Плеяд была сформирована выборка вероятных членов скопления. Был предложен метод «равномерного фона» для оценки вероятности принадлежности отобранных звезд к скоплению. Из этой выборки были отобраны звезды, имеющие высокую точность определения собственных движений и параллаксов для исследования кинематики и динамики скопления в рамках «детального» подхода. При этом удалось обнаружить вращение скопления (с привлечением данных о лучевых скоростях звезд). Оказалось, что ядро скопления вращается в прямом направлении, а внешние части скопления — в обратном. Зависимости от расстояния до центра скопления модулей тангенциальных и радиальных составляющих поля скоростей движения звезд ядра скопления в картинной плоскости содержат ряд периодических колебаний. Определены дисперсии скоростей звезд на разных расстояниях от центра скопления. Дисперсии скоростей в среднем возрастают с увеличением расстояния от центра скопления (в трехмерном пространстве). Обнаружена гравитационная неустойчивость ядра скопления, определены размеры области грави-



тационной неустойчивости в скоплении (на расстояниях от 2.2 до 5.7 пк от его центра).

В разделе 2.5 рассмотрены ближайшие окрестности скопления Альфа Персея [A22]. Исследование этого скопления осложняется тем, что оно проецируется на звездный поток,двигающийся в пространстве со скоростью, близкой к скорости движения скопления. Поэтому, получить выборку вероятных членов скопления, так же, как в случае Плеяд, не удастся. Для разделения звезд скопления, потока и поля был использован алгоритм DBSCAN. При этом, были впервые показаны внешний вид и структура потока, исследованы звездный состав и кинематические особенности потока. Население потока оказалось значительно старше населения скопления (возраст потока  $5\pm 1$  миллиардов лет, возраст скопления  $70\pm 6$  миллионов лет). Это подтверждается тем, что поток содержит заметное количество белых карликов. Верхний предел массы потока оценен в  $\sim 6000$  масс Солнца. Поток расположен в среднем на  $\sim 90$  парсек дальше скопления и имеет значительную протяженность по лучу зрения,  $\sim 180$  парсек, в проекции на небесную сферу протяженность потока примерно 70 градусов. Предполагается, что поток представляет собой остаток старого разрушенного звездного скопления. Обнаружены приливные хвосты скопления Альфа Персея, связанные с приливным воздействием гравитационного поля Галактики.

В разделе 2.6 исследуется причина формирования корон и их динамика [A13]. Было показано, что короны формируются из звезд, уходящих из скопления, но значительно более медленно по сравнению со звездами приливных хвостов. Звезды короны остаются в пределах ближайших окрестностей скопления (до четырех приливных радиусов) время, сравнимое со средним временем жизни РЗС. Временное равновесие корон обусловлено балансом числа звезд, приходящих в корону из центральных областей скопления и уходящих на периферию короны или за ее пределы. Оказалось, что несмотря на большую протяженность корон, они имеют признаки гравитационной связанности. Во-первых, значительная часть звезд короны движется по орбитам, близким к периодическим в обратном направлении (по сравнению с движением скопления по орбите в плоскости Галактики), а такие орбиты имеют большую устойчивость по сравнению с орбитами в прямом направлении. Во-вторых, 91–99% звезд короны на промежутках времени, сравнимых со средним временем жизни скопления, удовлетворяют критерию гравитационной связанности [20]. Также, для двухточечной модели скопления были обнаружены периодические орбиты звезд с энергиями, значительно превосходящими критическую энергию. Формирование таких орбит и большого числа близких

к ним обратных незамкнутых траекторий звезд в РЗС и в численных динамических моделях РЗС [21] вполне может быть причиной формирования корон в таких системах.

Для удобства работы по исследованию структуры РЗС был создан атлас скоплений Галактики [A19]. Атлас описан в разделе 2.7. Этот атлас реализован как набор карт (имеющихся в электронном виде) и как онлайн атлас, показывающий расположение и размеры скоплений в проекции на картинную плоскость для площадки произвольного размера, ориентированной либо вдоль экваториальных, либо вдоль галактических координат. Особенно удобен атлас для отождествления максимумов плотности на картах распределения звездной плотности или на изображениях неба. В дальнейшем предполагается развитие атласа, как за счет дополнения его данными о вновь открытых скоплениях и о их размерах, так и за счет дополнения его данными о расстояниях скоплений, что может превратить атлас в трехмерный.

### **Третья глава** *«Исследование населения шаровых скоплений».*

Представлены результаты исследования структуры и звездного состава шаровых скоплений  $\omega$  Centauri и Arp 2. В  $\omega$  Centauri исследовалось пространственное распределение звезд населений, имеющих разное содержание элементов группы железа и, следовательно, принадлежащих к разным поколениям звезд [A8, B5]. В Arp 2 пространственное распределение звезд голубых бродяг сравнивалось с распределением звезд горизонтальной ветви, красных гигантов и звезд главной последовательности [A11].

Для исследования пространственного распределения звезд разных населений в  $\omega$  Cen был предложен метод аппроксимации изолиний поверхностной плотности числа звезд эллипсами. С помощью этого метода удалось количественно охарактеризовать особенности распределения разных населений, видимые на картах поверхностной плотности. Во-первых, было показано, что центры распределений звезд различных населений не совпадают (особенно это проявляется во внутренних частях скопления). Во-вторых, ориентации эллипсов, аппроксимирующих изолинии плотности разных населений, в центральной части скопления отличаются примерно на 90 градусов. В третьих, население, более богатое тяжелыми элементами, сильнее концентрируется к центру скопления, чем население, более бедное тяжелыми элементами.

Эти структурные особенности соответствуют различным сценариям происхождения населений. Более сильная концентрация «металлического» населения к центру скопления поддерживает гипотезу о самообогащении (в смысле, что более «металлические» звезды образовались из вещества, обогащенного тяжелыми элементами, произведенными в звездах первого поколения). Раз-

личная вытянутость населений разной металличности в центральной части скопления и несовпадение центров распределения поддерживает гипотезу о происхождении населений в результате слияния скоплений с разной металличностью. Обе эти гипотезы вполне могут сосуществовать, если рассматривать  $\omega$  Cen как ядерное скопление карликовой галактики, поглощенной в свое время Млечным Путем.

В обоих скоплениях распределение звезд разных населений сравнивалось также с помощью статистического теста Колмогорова-Смирнова, как в одномерном, так и в двумерном варианте. В случае  $\omega$  Cen было показано, что распределение звезд населения бедного тяжелыми элементами значительно отличается от распределений звезд «металличного» и промежуточного населений, которые, в свою очередь, не различаются значительно [A8, B5]. В случае Arg 2 население голубых бродяг сравнивалось с населением звезд горизонтальной ветви, красных гигантов и звезд главной последовательности.

Оказалось, что пространственное распределение кандидатов в голубые бродяги значительно отличается от распределения звезд главной последовательности (голубые бродяги значительно сильнее концентрируются к центру скопления) [A11]. При этом, распределение голубых бродяг, красных гигантов и звезд горизонтальной ветви не различаются значительно. Все это интерпретируется таким образом, что голубые бродяги в Arg 2 представляют собой первичные двойные системы, в которых произошел перенос вещества с изначально более массивного компонента на изначально менее массивный компонент; последний стал более массивным, но не успел еще уйти с главной последовательности. Более высокая пространственная концентрация таких звезд к центру объясняется сегрегацией звезд по массе в динамически старом шаровом скоплении. Так как Arg 2 является одним из самых разреженных шаровых скоплений, внешне напоминающим рассеянное скопление, то образование голубых бродяг в нем путем прямых столкновений звезд считается маловероятным, в отличие от шаровых скоплений с высокой концентрацией звезд к центру.

Большая центральная концентрация красных гигантов и звезд горизонтальной ветви по сравнению со звездами главной последовательности объясняется также сегрегацией звезд по массе, произошедшей еще тогда, когда предшественники красных гигантов и звезд горизонтальной ветви были еще звездами главной последовательности, более массивными по сравнению с сегодняшним населением главной последовательности.

В целом, можно сказать, что применение статистических методов при исследовании пространственного распределения звезд разных населений позво-

лило соискателю интерпретировать различия в распределении звезд с точки зрения происхождения этих населений.

**Четвертая глава** *«Экстремально молодые звездные скопления в областях звездообразования».*

В этой главе приведены результаты исследования молодых звездных скоплений в Большом Магеллановом Облаке и в нашей Галактике. В случае скопления NGC 2070 в БМО мы имеем дело с ближайшей к Солнечной системе областью взрывного звездообразования ('star-burst'). Интерес к этому скоплению у соискателя был вызван тем обстоятельством, что распределение звезд в гало скопления NGC 2070 по данным Паркера [22] показало неоднородности в виде дуг (или оболочек), совпадающих с положением газовых волокон туманности Тарантул. Выделенные соискателем подгруппы (или субскопления) в гало NGC 2070 [A3] показывают возможное различие в возрасте по нижней точке поворота главной последовательности, хотя какой-либо градиент возраста обнаружить не удалось. Наличие большого количества подгрупп в гало NGC 2070 приводит к тому, что радиальные профили плотности скопления, построенные для различных направлений от центра скопления, показывают значительные неоднородности в виде ступенек и вторичных максимумов [A4]. Все это естественно объясняется малым возрастом скопления, значительно меньшим времени бурной релаксации. На основе этого был сделан вывод о том, что звезды подгрупп находятся вблизи мест своего рождения.

При исследовании распределения звезд в Галактической области звездообразования G174+2.5 были использованы каталог точечных источников обзора 2MASS. Анализ карт поверхностной плотности числа звезд, проведенный в работе [A9], позволил обнаружить два неизвестных ранее относительно бедных скопления S235North-West и S232IR. Правда, впоследствии оказалось, что скопление S235North-West было открыто ранее в работе [23], где оно получило название FSR 784. Также, это скопление было независимо открыто в работе [24], там оно названо Korosov 7. Было показано, что скопления S235 East1, East2, Central, North-West и A-B-C имеют сложную структуру и состоят из субскоплений. Вблизи этих скоплений имеются, также, небольшие группы-спутники.

**Пятая глава** *«Функции светимости, функции масс и оценки массы рассеянных звездных скоплений».*

В Главе 5 рассмотрены вопросы получения функции светимости (ФС), функции блеска (ФБ) и функции масс (ФМ) звездных скоплений, их исследования, а также их использования для получения оценок массы звездных

скоплений. ФБ, ФС и ФМ — это классический пример использования статистического подхода к исследованию звездного состава скоплений. Для получения ФБ и ФС автором настоящей работы было предложено использовать метод KDE [A5]. Этот подход был использован для получения функций блеска шарового скопления Palomar 1 [A6], функций блеска и функции масс рассеянных скоплений NGC 4815 [A7], NGC 4337 [A17,B11], Ruprecht 147 [A20,B25], Плеяды [A23,B25] и других [B13-B15,B18,B20].

Основной проблемой при получении ФБ и ФС звездных скоплений методом KDE являются крупномасштабные флуктуации плотности звезд поля, как, впрочем, и для любых других статистических методов (на что обращалось внимание еще в [A2]). Ключевым моментом при таких исследованиях является правильный выбор площадки (площадок) сравнения. Для этого необходимо правильно определить размеры скопления, изучить распределение плотности звезд в окрестностях скопления с помощью карт поверхностной плотности, учесть наличие соседних скоплений (для этого удобно использовать новый Атлас рассеянных скоплений, доступный онлайн [A19,B16,B19]).

По функциям блеска и функциям масс, построенным методом KDE, можно исследовать особенности звездного состава скоплений. Для этого в работах [A6,A7] применялись различные статистические подходы для оценки значимости минимумов ФБ. В работах [A17,A23] определялся наклон функции масс в различных диапазонах массы. Для скоплений Ruprecht 147 и Плеяды функция масс строилась отдельно для ядра и для гало скопления (в проекции на картинную плоскость), что позволило показать значимую сегрегацию звезд по массе, особенно хорошо заметную у Ruprecht 147 [A20,A23]. ФБ и ФМ, построенные методом KDE, позволяют лучше увидеть особенности распределения звезд по звездным величинам или по массам, чем ФБ и ФМ, построенные методом гистограмм. Причина в том, что при использовании гистограмм данные для разных точек объединяются по произвольно выбранным интервалам (это так называемый ‘binning’); метод KDE свободен от этого недостатка.

Для скопления NGC 4337 в работе [A17,B11] было проведено сравнение фотометрических оценок массы (по ФБ) и динамических оценок. Динамические оценки были получены на основе значения дисперсии скоростей для выборки звезд, у которых лучевые скорости были измерены на много-объектном спектрографе FLAMES телескопа VLT. Оказалось, что динамические оценки массы в несколько раз превышают фотометрические. Конечно, любая фотометрическая оценка массы является нижней оценкой, так как нам неизвестна часть ФБ для маломассивных звезд, нам неизвестно количество невидимых

остатков проэволюционировавших звезд (нейтронных звезд и черных дыр), а также, нам неизвестно количество неразрешенных кратных звезд в скоплении. Но приблизительный учет всех этих факторов не позволяет согласовать фотометрическую и динамические оценки массы. Был сделан вывод, что значение дисперсии скоростей, по которому получались динамические оценки массы, завышено. Причинами могут быть ошибки измерения лучевых скоростей, наличие в выборке звезд не-членов скопления, а также присутствие в выборке неразрешенных двойных звезд, являющихся спектроскопически-двойными, у которых в спектре видны линии только главного компонента. В таком случае, измеренные лучевые скорости будут отличаться от лучевой скорости центра масс двойной системы. Для того, чтобы разобраться в этой проблеме, возможно, понадобится моделирование выборки с различными источниками ошибок.

В работах [A21,A24,B21] было исследовано влияние неразрешенных двойных звезд и звезд большей кратности на фотометрическую оценку массы скопления. Для оценки такого влияния был предложен метод «составления пары с ограничением по светимости» ('luminosity-limited pairing'). В итоге, были получены поправочные коэффициенты к массе скопления (полученной в предположении, что все звезды являются одиночными) для различных долей кратных звезд, различных предположений о распределении отношения масс компонент и для различных долей систем разной кратности в скоплении. В [A24] показано, что поправочный коэффициент за наличие неразрешенных двойных систем, полученный в [28] для скопления Ясли, сильно завышен; обсуждаются причины ошибки авторов [28]. В [A24] обсуждается также влияние на долю неразрешенных двойных систем пространственного разрешения различных обзоров неба.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы, а также намечены направления дальнейшего развития исследований.

Соискатель выражает благодарность своим коллегам и соавторам В.М. Данилову, А.М. Соболеву, Дж. Карраро, Дж. Пиотто, Р. Капуццо Дольчетта, Л. Присинцано, Е. Панчино, А.В. Локтину, Е.А. Аввакумовой, О.И. Бородиной, В.В. Никифоровой, М.В. Кулешу за помощь и плодотворное сотрудничество, а также благодарит Дэвида Мерритта за благожелательную поддержку и знакомство с современными методами оценивания плотности вероятности.

В представленной работе была использована база данных WEBDA, поддерживаемая Кафедрой теоретической физики и астрофизики Университета Масарика (г. Брно, Чешская республика).

Работа использует данные обзора 2MASS, который является совместным проектом Университета штата Массачусеттс и Центра Обработки и Анализа Инфракрасных Данных Калифорнийского Технологического Института, финансируемого NASA и Национальным Научным Фондом.

В этой работе использованы данные космической миссии Gaia Европейского космического агентства (ESA). Эти данные обрабатываются Консорциумом обработки и анализа данных Gaia (DPAC). Финансирование DPAC обеспечивается национальными учреждениями, в частности, учреждениями, участвующими в Многостороннем Соглашении Gaia.

Вебсайт миссии Gaia — <https://www.cosmos.esa.int/gaia>, вебсайт архива данных Gaia — <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>.

### **Основные идеи и результаты настоящей диссертации опубликованы в работах**

- A1. Seleznev A. F. Stellar surface density distributions in ten open clusters // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. — 1994. — Vol. 4, Is. 3. — P. 167-177.
- A2. Danilov V. M., Seleznev A. F. The catalogue of structural and dynamical characteristics of 103 open star clusters and the first results of its investigation // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. — 1994. — Vol. 6, Is. 2. — P. 85-156.
- A3. Селезнев А. Ф. Структура гало звездного скопления NGC 2070 // *Письма в Астрономический журнал*. — 1995. — Т. 21, № 10. — С. 743-749.
- A4. Селезнев А. Ф. Звездные подсчеты в скоплении NGC 2070 // *Астрономический журнал*. — 1997. — Т. 74, № 6. — С. 837-844.
- A5. Селезнев А. Ф. О методике оценивания функции масс и функции светимости звездного скопления // *Астрономический журнал*. — 1998. — Т. 75, № 2. — С. 180-187.
- A6. Селезнев А. Ф., Карраро Д., Пиотто Дж., Розенберг А. Функция светимости скопления Palomar 1 – испытание новой методики // *Астрономический журнал*. — 2000. — Т. 77, № 1. — С. 15-20.
- A7. Prisinzano L., Carraro G., Piotto G., Seleznev A. F., Stetson P. B., Saviane I. Luminosity and mass function of galactic open clusters I. NGC 4815 // *Astronomy and Astrophysics* — 2001. — Vol. 369, Is. 3. — P. 851-861.

- A8. Pancino E., Seleznev A. F., Ferraro F. R., Bellazzini M., Piotto G. The multiple stellar population in  $\omega$  Centauri: spatial distribution and structural properties // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2003. — Vol. 345, Is. 2. — P. 683-690.
- A9. Kirsanova M. S., Sobolev A. M., Thomasson M., Wiebe D. S., Johansson L. E. B., Seleznev A. F. Star formation around the HII region Sh2-235 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2008. — Vol. 388, Is. 2. — P. 729-736.
- A10. Seleznev A. F., Carraro G., Costa E., Loktin A. V. Homogeneous photometry and star counts in the field of 9 Galactic star clusters // New Astronomy — 2010. — Vol. 15, Is. 1. — P. 61-75.
- A11. Carraro G., Seleznev A. F. An analysis of the blue straggler population in the Sgr dSph globular cluster Arp 2 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2011. — Vol. 412, Is. 2. — P. 1361-1366.
- A12. Carraro G., Seleznev A. F. UBVI CCD photometry and star counts in nine inner disc Galactic star clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2012. — Vol. 419, Is. 4. — P. 3608-3623.
- A13. Данилов В. М., Путков С. И., Селезнев А. Ф. Динамика корон рассеянных звездных скоплений // Астрономический журнал. — 2014. — Т. 91, № 12. — С. 1019-1035.
- A14. Carraro G., Seleznev A. F., Baume G., Turner D. G. The complex stellar populations in the background of open clusters in the third Galactic quadrant // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2016. — Vol. 455, Is. 4. — P. 4031-4045.
- A15. Seleznev A. F. Open-cluster density profiles derived using a kernel estimator // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2016. — Vol. 456, Is. 4. — P. 3757-3773.
- A16. Seleznev A. F. Kernel density estimation in the study of star clusters // Baltic Astronomy — 2016. — Vol. 25, Is. 3. — P. 267-274.
- A17. Seleznev A. F., Carraro G., Capuzzo Dolcetta R., Monaco L., Baume G. On the mass of the Galactic star cluster NGC 4337 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2017. — Vol. 467, Is. 3. — P. 2517-2528.



- A18. Carraro G., Baume G., Seleznev A. F., Costa E. On the assessment of the nature of open star clusters and the determination of their basic parameters with limited data // *Astrophysics and Space Science* — 2017. — Vol. 362 , article id. 128.
- A19. Seleznev A. F., Avvakumova E., Kulesh M., Filina J., Tsaregorodtseva P., Kvashnina A. New atlas of open star clusters // *Open Astronomy* — 2017. — Vol. 26, Is. 1. — P. 80-87.
- A20. Yeh F. C., Carraro G., Montalto M., Seleznev A. F. Ruprecht 147: A Paradigm of Dissolving Star Cluster // *The Astronomical Journal* — 2019. — Vol. 157, Is. 3 , article id. 115.
- A21. Borodina O. I., Seleznev A. F., Carraro G., Danilov V. M. Unresolved Binaries and Galactic Clusters' Mass Estimates // *The Astrophysical Journal* — 2019. — Vol. 874, Is. 2, article id. 127.
- A22. Nikiforova V. V., Kulesh M. V., Seleznev A. F., Carraro G. The relation of the Alpha Persei star cluster with the nearby stellar stream // *The Astronomical Journal* — 2020. — Vol. 160, Is. 3 , article id. 142.
- A23. Danilov V. M., Seleznev A. F. On the motion of stars in the Pleiades according to Gaia DR2 data // *Astrophysical Bulletin* — 2020. — Vol. 75, Is. 4. — P. 407-424.
- A24. Borodina O. I., Carraro G., Seleznev A. F., Danilov V. M. Unresolved multiple stars and Galactic clusters' mass estimate // *The Astrophysical Journal* — 2021. — Vol. 908, Is. 1, article id. 60.

**Кроме того, результаты изложены в**

- B1. Селезнев А. Ф. Структура звездного скопления NGC 2070 в Большом Магеллановом облаке // *Физика Космоса: труды 24-ой студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 30 янв. – 03 февр. 1995 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 1995. — С. 48.
- B2. Seleznev A. F. Star counts in LMC cluster NGC 2070 and structure of its halo // *Structure and Evolution of Stellar Systems. Proceedings of International Conference* (Petrozavodsk, Aug. 13–17 1995). — St.Petersburg: St.Pb.Univ. Press. — 1997. — P. 127-130.

- B3. Seleznev A. F., Prisinzano L., Carraro G., Piotto G., Saviane I. Investigation of the luminosity function of open cluster NGC 4815 // JENAM-2000. Abstracts of 9-th European and 5-th Euro-Asian Astronomical Society Conference (Moscow, May 29-June 3, 2000). — P.60.
- B4. Селезнев А. Ф., Ferraro F., Bellazzini M., Pancino E., Piotto G. Статистическое исследование видимого распределения звезд различных населений в шаровом скоплении  $\omega$  Cen // Физика Космоса: труды 30-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 янв. – 02 февр. 2001 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2001. — С. 207.
- B5. Seleznev A. F., Pancino E., Piotto G., Ferraro F. R., Bellazzini M. Statistical Investigation of Apparent Distributions of Different Population RGB Stars in  $\omega$  Cen // Astronomical Society of the Pacific Conference Proceedings — 2003. — Vol. 296. — P. 311-312.
- B6. Селезнев А. Ф., Carraro G., Sarajedini A., Kinemuchi K. Исследование структуры рассеянного скопления М35 // Физика Космоса: труды 39-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 01–05 февр. 2010 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2010. — С. 249.
- B7. Селезнев А. Ф., Carraro G. ПЗС фотометрия и исследование структуры четырех рассеянных скоплений // Физика Космоса: труды 40-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 31 янв. – 04 февр. 2011 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2011. — С. 330.
- B8. Селезнев А. Ф. Короны рассеянных звездных скоплений // Физика Космоса: труды 41-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 янв. – 03 февр. 2012 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2012. — С. 252.
- B9. Селезнев А. Ф. Построение профилей плотности рассеянных звездных скоплений с помощью метода функции-ядра // Физика Космоса: труды 44-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 02–06 февр. 2015 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2015. — С. 195.
- B10. Селезнев А. Ф. Звездные скопления Галактики: современный взгляд // Физика Космоса: труды 45-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 01–05 февр. 2016 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2016. — С. 125-139.

- B11. Seleznev A. F., Capuzzo Dolcetta R., Carraro G. The Galactic star cluster NGC 4337: estimates of its photometric and dynamical mass // *Memorie della Societa Astronomica Italiana* — 2016. — Vol. 87. — P. 699-700.
- B12. Селезнев А. Ф. Звезды – голубые бродяги // *Физика Космоса: труды 46-ой студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 30 янв. – 03 февр. 2017г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2017. — С. 93-99.
- B13. Бородина О. И., Селезнев А. Ф. Исследование рассеянных звездных скоплений NGC 4052, NGC 5715 и NGC 6834 // *Физика Космоса: труды 46-ой студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 30 янв. – 03 февр. 2017г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2017. — С. 176.
- B14. Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Исследование рассеянных звездных скоплений NGC 1912, NGC 7142 и IC 2714 // *Физика Космоса: труды 46-ой студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 30 янв. – 03 февр. 2017г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2017. — С. 182.
- B15. Никифорова В. В., Селезнев А. Ф. Исследование рассеянных звездных скоплений NGC 2099, NGC 6268 и Czernik 38 // *Физика Космоса: труды 46-ой студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 30 янв. – 03 февр. 2017г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2017. — С. 186.
- B16. Филина Ю. И., Царегородцева П. М., Селезнев А. Ф. Атлас рассеянных звездных скоплений // *Физика Космоса: труды 46-ой студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 30 янв. – 03 февр. 2017г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2017. — С. 200.
- B17. Бородина О. И., Селезнев А. Ф., Данилов В. М. Учет неразрешенных двойных систем при оценивании массы звездного скопления // *Физика Космоса: труды 47-й студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 29 янв. – 02 февр. 2018г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2018. — С. 157-158.
- B18. Кулеш М. В., Бородина О. И., Никифорова В. В., Селезнев А. Ф. Сравнение результатов звездных подсчетов в девяти рассеянных звездных скоплениях по данным 2MASS и Gaia DR1 // *Физика Космоса: труды 47-й студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 29 янв. – 02 февр. 2018г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2018. — С. 167-168.
- B19. Филина Ю. И., Селезнев А. Ф., Аввакумова Е. А., Квашнина А. В., *Онлайн-атлас рассеянных звездных скоплений* // *Физика Космоса: тру-*

- ды 47-й студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 янв. – 02 февр. 2018г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2018. — С. 190-191.
- В20. Никифорова В. В., Кулеш М. В., Бородина О. И., Селезнев А. Ф. Структурные и динамические характеристики девяти рассеянных звездных скоплений // Физика Космоса: труды 47-й студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 янв. – 02 февр. 2018г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2018. — С. 175-176.
- В21. Селезнев А. Ф., Бородина О. И., Данилов В. М., Карраро Дж. Влияние неразрешенных двойных на оценку массы рассеянного звездного скопления // *Астрономия-2018. Том 1. Современная звездная астрономия 2018* — Москва: Тривант. — 2018. — С.270-273.
- В22. Бородина О. И., Селезнев А. Ф. Исследование населения двойных звезд в рассеянных звездных скоплениях // Физика Космоса: труды 48-й студенческой научной конференции (Екатеринбург, 28 янв. – 01 февр. 2019 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2019. — С. 149.
- В23. Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Сравнение функций блеска рассеянных звездных скоплений по данным 2MASS и Gaia DR2 // Физика Космоса: труды 48-й студенческой научной конференции (Екатеринбург, 28 янв. – 01 февр. 2019 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2019. — С. 159-160.
- В24. Никифорова В. В., Селезнев А. Ф. Исследование близких к Солнцу рассеянных звездных скоплений в Линдбладовской системе координат // Физика Космоса: труды 48-й студенческой научной конференции (Екатеринбург, 28 янв. – 01 февр. 2019 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2019. — С. 161.
- В25. Seleznev A. F., Danilov V. M., Carraro G. Investigation of the nearby open clusters with Gaia DR2 data // *Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe, Proceedings IAU Symposium No. 351* — Cambridge Univ. Press. — 2020. — P. 502-506.
- В26. Никифорова В. В., Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Структура и кинематика широких окрестностей рассеянного скопления Альфа Персея // Физика Космоса: труды 49-й студенческой научной конференции (Екатеринбург, 27–31 янв.2020 г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2020. — С. 95-96.

В27. Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Метод определения радиуса скопления по радиальному профилю плотности // *Астрономия и исследование космического пространства: труды Всероссийской с международным участием научной конференции студентов и молодых ученых (Екатеринбург, 01 – 05 февр. 2021 г.)*. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2021. — С. 42-45.

## Список литературы

- [1] *Carraro G., de Grijs R., Elmegreen B., et al.* Division VII: Commission 37: Star Clusters and Associations // *Transactions IAU*. — 2015. — Vol. 10, Issue T28. — P. 128-131.
- [2] *Ефремов Ю.Н.* Очаги звездообразования в галактиках // *Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы: Москва*. — 1989. — 248 с.
- [3] *Brandl B., Sams B.J., Bertoldi F., et al.* Adaptive optics near-infrared imaging of R136 in 30 Doradus: the stellar population of a nearby starburst // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — Vol. 466. — P. 254-273.
- [4] *Portegies Zwart, S.F., McMillan S.L.W., Gieles M.* Young massive star clusters // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — Vol. 48. — P. 431-493.
- [5] *Liermann A., Hamann W.-R., Oskinova L.M.* The Quintuplet cluster. III. Hertzsprung-Russell diagram and cluster age // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 540, article id. A14. — 9 p.
- [6] *Shin J. Kim S.S.* Low-end mass function of the Arches cluster // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 447. — P. 366-373.
- [7] *Gratton R.G., Carretta E., Bragaglia A.* Multiple populations in globular clusters. Lessons learned from the Milky Way globular clusters // *The Astronomy and Astrophysics Review*. — 2012. — Vol. 20, article id. 50. — 54 p.
- [8] *Piotto G.* Observations of multiple populations in star clusters // *The Ages of Stars, Proceedings of the 258 International Astronomical Union (IAU) Symposium, Baltimore, MD, October 13–17, 2008, Ed.: Mamajek E.E.,*

- Soderblom D.R., Wyse R.F.G. Cambridge University Press: Cambridge. — 2009. — P. 233-244.*
- [9] *Charbonnel C. Young and old massive star clusters: Theoretical challenges for the next decade // Formation, evolution, and survival of massive star clusters, Proceedings of the 316 International Astronomical Union (IAU) Symposium, Honolulu, August 11–14, 2015, Ed.: Charbonnel C., Nota A. Cambridge University Press: Cambridge. — 2017. — P. 1-8.*
- [10] *Do T., Martinez G.D., Yelda S., et al. Three-dimensional stellar kinematics at the Galactic center: measuring the nuclear star cluster spatial density profile, black hole mass, and distance // The Astrophysical Journal Letters. — 2013. — Vol. 779, article id. L6. — 7 p.*
- [11] *Neumayer N. Nuclear star clusters // Formation, evolution, and survival of massive star clusters, Proceedings of the 316 International Astronomical Union (IAU) Symposium, Honolulu, August 11–14, 2015, Ed.: Charbonnel C., Nota A. Cambridge University Press: Cambridge. — 2017. — P. 84-90.*
- [12] *Harris W.E. Young, old, massive: Steps to understanding globular cluster formation // Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe, Proceedings of the 351 International Astronomical Union (IAU) Symposium, Bologna, May 27–31, 2019, Ed.: Bragaglia A., Davies M., Sills A., Vesperini E. Cambridge University Press: Cambridge. — 2020. — P. 502-506.*
- [13] *Samal M.R., Ojha D.K., Jose J., et al. Star formation in the filament of S254-S258 OB complex: a cluster in the process of being created // Astronomy and Astrophysics. — 2015. — Vol. 581, article id. A5. — 14 p.*
- [14] *Rivera-Ingraham A., Martin P.G., Polychroni D., et al. Herschel Observations of the W3 GMC (II): Clues to the Formation of Clusters of High-mass Stars // The Astrophysical Journal. — 2015. — Vol. 809, article id. 81. — 13 p.*
- [15] *Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J.H.J., et al. The Gaia mission // Astronomy and Astrophysics. — 2016. — Vol. 595, article id. A1. — 36 p.*
- [16] *Gaia Collaboration, Brown A.G.A., Vallenari A., et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Vol. 616, article id. A1. — 22 p.*

- [17] *Gaia Collaboration, Brown A.G.A., Vallenari A., et al.* Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Vol. 649, article id. A1. — 20 p.
- [18] *Jerabkova T., Boffin H.M.J., Beccari G., et al.* A stellar relic filament in the Orion star-forming region // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 489. — P. 4418-4428.
- [19] *Beccari G., Boffin H.M.J., Jerabkova T.* Uncovering a 260 pc wide, 35-Myr-old filamentary relic of star formation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 491. — P. 2205-2216.
- [20] *Ross D.J., Mennim A., Heggie D.C.* Escape from a tidally limited star cluster // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1997. — Vol. 284. — P. 811-814.
- [21] *Данилов В.М., Дорогавцева Л.В.* Временные шкалы механизмов динамической эволюции рассеянных звездных скоплений // *Астрономический Журнал*. — 2008. — Т. 85. — С. 524–536.
- [22] *Parker J.W.* The OB associations of 30 Doradus in the Large Magellanic Cloud. I. Stellar observations and data reduction // *The Astronomical Journal*. — 1993. — Vol. 106. — P. 560-577.
- [23] *Froebrich D., Scholz A., Raftery C.L.* A systematic survey for infrared star clusters with  $|b| < 20^\circ$  using 2MASS // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2007. — Vol. 374. — P. 399-408.
- [24] *Koposov S.E., Glushkova E.V., Zolotukhin I.Yu.* Automated search for Galactic star clusters in large multiband surveys. I. Discovery of 15 new open clusters in the Galactic anticenter region // *Astronomy and Astrophysics*. — 2008. — Vol. 486. — P. 771-777.
- [25] *Chavarría L.A., Allen L.E., Hora J.L., et al.* Spitzer observations of the massive star-forming complex S254-S258: structure and evolution // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 682. — P. 445–462.
- [26] *Camargo D., Bonatto C., Bica E.* A possible sequential star formation in the giant molecular cloud G174+2.5 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 416. — P. 1522–1534.

- [27] *Aarseth S.J., Hills J.G.* The dynamical evolution of a stellar cluster with initial subclustering // *Astronomy and Astrophysics*. — 1972. — Vol. 21. — P. 255-263.
- [28] *Khalaj P., Baumgardt H.* The stellar mass function, binary content and radial structure of the open cluster Praesepe derived from PPMXL and SDSS data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 434. — P. 3236-3245.