

«Утверждаю»

Проректор по научной работе

УрФУ

А.В.Германенко

2021 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объединенного семинара Коуровской астрономической обсерватории и кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ о диссертации Селезнева Антона Федоровича «Исследования населения, структуры и динамики звездных скоплений» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия).

Выписка из протокола №3 заседания объединенного семинара Коуровской астрономической обсерватории и кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ от 8 сентября 2021 г.

**Присутствовали:** преподаватели и сотрудники астрономической обсерватории и кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ:

1. В. М. Данилов, главный научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, доктор физико-математических наук;
2. Э. Д. Кузнецов, заведующий кафедрой астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ, доктор физико-математических наук;
3. А. М. Соболев, директор Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук;
4. А. И. Васюнин, заведующий лабораторией астрохимии кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ, PhD, кандидат физико-математических наук;
5. С. Ю. Горда, ведущий научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук;
6. Г. Т. Кайзер, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук,
7. А. В. Кожевникова, младший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук;
8. Т. И. Левитская, доцент кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ, кандидат физико-математических наук;
9. Е. И. Старицин, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук;
10. М. Э. Попова, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук;
11. С. В. Салий, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук;

12. К. Г. Грибанов, ведущий научный сотрудник лаборатории физики климата и окружающей среды, доцент кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ, кандидат физико-математических наук;
13. С. Ю. Парfenov, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории, кандидат физико-математических наук;
14. Н. Д. Калинина, научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории;
15. А. И. Шагабутдинов, заместитель директора Коуровской астрономической обсерватории.
16. В. С. Сафонова, ассистент кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ;
17. М. А. Васильева, аспирант кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ;
18. М. Ю. Кискин, аспирант кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ;
19. М. В. Кулеш, аспирант кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ;
20. Студенты кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ.

**Слушали.** Сообщение старшего научного сотрудника Коуровской астрономической обсерватории и доцента кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ А.Ф.Селезнева о содержании докторской работы «Исследование населения, структуры и динамики звездных скоплений», представляющей на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Работа выполнена в Уральском федеральном университете. В дискуссии по докладу выступили: В. М. Данилов, С. Ю. Горда, Г. Т. Кайзер, Т. И. Левитская, А. М. Соболев, М. Э. Попова, А. И. Васюнин, Е. И. Старицин, С. Ю. Парfenов, М. В. Кулеш.

**Объединенный семинар отмечает.**

**Актуальность работы** определяется взрывным ростом количества новых открытий, публикаций и общего интереса к исследованию звездных скоплений в нашей и в других галактиках за последние 20 – 30 лет.

Были обнаружены и стали объектом интенсивного исследования молодые населенные скопления с возрастами  $10^6$  –  $10^9$  лет и массами, как у шаровых скоплений Галактики. Сначала такие скопления были найдены в Магеллановых Облаках, а потом и в нашей Галактике.

В последние двадцать лет возобновился интерес к шаровым скоплениям 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.

В последние годы открылось новое направление исследований – изучение центральных (ядерных) скоплений галактик. Особенный интерес представляет сложная динамика этих скоплений, часто имеющих в центре сверхмассивную черную дыру. Очень важно также то, что несколько шаровых скоплений Галактики оказались ядерными скоплениями карликовых галактик, поглощенных в свое время Млечным Путем.

Значительное внимание в последние годы уделяется изучению систем звездных скоплений других галактик.

Благодаря обзорам неба, проведенным в инфракрасном диапазоне, появилась возможность изучать экстремально молодые звездные скопления, находящиеся в стадии формирования и расположенные глубоко внутри гигантских молекулярных облаков.

Активность исследования звездных скоплений Галактики, особенно рассеянных звездных скоплений, в самые последние годы значительно выросла благодаря успешной работе космической миссии Gaia.

**Научная новизна.** Работы А.Ф.Селезнева посвящены большинству современных направлений исследований. Новыми являются:

1. 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.
2. 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 миллиарда лет и расположен в среднем в 90 парсеках дальше скопления. Обнаружены приливные хвосты скопления Ruprecht 147.
3. Предложен «метод равномерного фона» для оценки вероятности принадлежности группы звезд к скоплению. Получена выборка вероятных членов скопления Плеяды.
4. Подтверждено существование протяженных корон рассеянных звездных скоплений. Впервые рассмотрена динамика корон рассеянных звездных скоплений и объяснено их существование.
5. Отработана методика получения функций блеска (функций светимости) и функций масс звездных скоплений с помощью метода Kernel Density Estimator, показаны преимущества этого метода перед методом гистограмм.
6. 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.

7. 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» и доказано, что именно этот метод должен использоваться при уточнении массы скопления за счет наличия неразрешенных кратных звезд.

8. Впервые показано существование значимых различий в пространственном распределении звезд разных населений в шаровом скоплении ω Цен.

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

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

11. Обнаружено новое, не известное ранее звездное скопление 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 ценность.**

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 химической эволюции. Звездные скопления содержат уникальные астрофизические объекты («голубые бродяги», миллисекундные пульсары, катализмические 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.

**Публикации и апробация работы.** Результаты по теме диссертации докладывались на объединенном семинаре Коуровской астрономической обсерватории и кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды УрФУ, на 26 всероссийских и международных (Международная конференция "Structure and Evolution of Stellar Systems", г. Петрозаводск, Карелия, Россия, 13-17 августа 1995 г.; JENAM-2000, 9-th European and 5-th Euro-Asian Astronomical Society Conference, г. Москва, Россия, 29 мая - 3 июня 2000 г.; Международная конференция "New horizons in globular cluster astronomy", г. Падуя, Италия, 24-28 июня 2002 г.; 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.; Международная конференция "Stellar aggregates over mass and spatial scales", г. Бад-Хоннеф, Германия, 05-09 декабря 2016 г.; Международная конференция MODEST 17 "Under Prague's Starry Skies", г. Прага, Чешская республика, 18-22 сентября 2017 г.; IAU Symposium No. 351, MODEST 19 "Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe", г. Болонья, Италия, 27-31 мая 2019 г. и др.) конференциях. Основные результаты опубликованы в 24 статьях в ведущих рецензируемых журналах, а также в 7 статьях в сборниках трудов конференций. Опубликованы резюме 20 докладов. Всего публикаций по теме диссертации — 51.

### **Личный вклад и участие автора в работах по теме диссертации.**

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 в тексте диссертации при описании отдельных полученных результатов.

В частности, соискателем:

1. Разработан метод аппроксимации изолиний поверхностной плотности эллипсами.
2. Получены формулы для построения радиального профиля пространственной плотности методом KDE.
3. Предложена методика для оценки радиуса скопления по радиальному профилю плотности.

4. Предложена методика для определения центра скопления с помощью линейной плотности, полученной методом KDE.
5. Предложен метод оценки вероятности принадлежности группы звезд к скоплению («метод равномерного фона»).
6. Получена система уравнений для определения массы компонент неразрешенной двойной системы по ее светимости (метод «составления пары с ограничением по светимости»; 'luminosity-limited pairing').
7. Создано программное обеспечение на языке FORTRAN и отработано применение метода KDE для получения функций распределения, характеризующих звездное скопление (определение центра скопления, получение радиальных профилей плотности и карт поверхностной плотности, получение функции светимости и функции масс скопления, получение распределения звезд скопления по скоростям, построение диаграмм Хесса).

#### **На защиту выносятся следующие основные результаты.**

1. Получены структурные и фотометрические характеристики 25 мало изученных рассеянных скоплений. Получена формула для построения радиального профиля пространственной плотности в случае, когда известны координаты звезд в трехмерном пространстве.
2. Обнаружено искривление и расширение диска Галактики в направлении третьего галактического квадранта.
3. Подтверждено существование протяженных корон рассеянных звездных скоплений. Исследована динамика корон численных моделей скоплений, выяснена причина формирования корон скоплений.
4. 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.
5. Создан новый Атлас рассеянных звездных скоплений.
6. Исследование близких рассеянных скоплений. 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, свидетельствующие о том, что это скопление было ядерным скоплением карликовой галактики, аккрецированной Млечным Путем. Обнаружена сильная концентрация голубых бродяг к центру шарового скопления Arp 2.
8. Обнаружена сложная структура гало экстремально молодого звездного скопления NGC 2070 в Большом Магеллановом Облаке. Исследовано распределение погруженных скоплений в области звездообразования G174+2.5, обнаружено неизвестное ранее скопление.

9. Показано, как изменяется оценка массы звездного скопления, получаемая по его функции светимости, из-за наличия неразрешенных двойных и кратных систем в скоплении. Предложен метод «составления пары с ограничением по светимости» для определения масс компонент неразрешенной кратной системы.

**Объединенный семинар считает.**

Представленная А.Ф.Селезневым диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Она содержит новые, важные в научном и практическом отношении результаты и вносит существенный вклад в изучение звездных скоплений. Работа выполнена в УрФУ по теме НИР №FEUZ–2020–0030 «Исследования в области астрофизики, звездной астрономии и небесной механики». Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по физико-математическим наукам, и может быть рекомендована к защите.

**Постановили.** Рекомендовать диссертационную работу А.Ф.Селезнева «Исследование населения, структуры и динамики звездных скоплений» к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в Диссертационном совете Д 002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской Академии Наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Руководитель объединенного семинара

Директор Коуровской астрономической  
обсерватории УрФУ



А.М.Соболев