

На правах рукописи

Постникова Екатерина Сергеевна

**Кинематика и эволюция рассеянных звездных
скоплений по данным Gaia**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. **Верещагин Сергей Викторович**, старший научный сотрудник ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва

Научный консультант:

к.ф.-м.н. **Чупина Наталия Викторовна**, старший научный сотрудник ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н. **Дамбис Андрей Карлович**, заведующий отделом астрометрии и службы времени Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), г. Москва

д.ф.-м.н., **Бобылев Вадим Вадимович**, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией динамики Галактики ФГУБН Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН)

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится 24 июня 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 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 ФГБУН Института астрономии РАН и на сайте

http://www.inasan.ru/scientific_activities/diss_council/diss/

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 002.280.01
кандидат физ.-мат. наук



Н. В. Чупина

Общая характеристика работы

Актуальность работы Рассеянные звездные скопления (РЗС) – гравитационно-связанные звездные системы, в которые входит от нескольких десятков до нескольких тысяч звезд. Они являются отличным инструментом для анализа звездообразования и эволюции Галактики. По различным оценкам (см., например, [1], [2]), считается, что в нашей Галактике приблизительно 10^5 рассеянных звездных скоплений. Накопление знаний о скоплениях сформировало картину разнообразия их видов. Существуют как рыхлые конгломераты из нескольких десятков звезд, такие как NGC 3680, так и густонаселенные (например, М 11), среди которых есть и достаточно старые, типа скопления М 67. Большинство из них сосредоточено в тонком диске близко к галактической плоскости, однако некоторые расположены вне его и имеют нехарактерную для диска металличность, например, NGC 2158. Границы классификаций шаровых и рассеянных скоплений перекрываются между собой, а значит, существуют скопления «переходного» типа, которые можно отнести по разным критериям и к тому и к другому классу, что ставит интересные задачи для понимания природы их формирования и эволюции.

В представленной работе мы рассмотрели ряд звездных скоплений, потоков и ассоциаций. Перед нами стояла задача определить их пространственно-кинематические параметры, в частности, пространственную форму. Полученные данные мы сопоставили со схемой распада и эволюции, [3].

До опубликования данных космического аппарата (КА) Gaia (до “эпохи Gaia”) было детально изучено приблизительно 4000 скоплений (MWSC [4], WEBDA [5]). По мере выхода версий каталогов Gaia (URL: <https://gea.esac.esa.int/archive/>) появились новые данные о звездах, в том числе, слабых. Обнаружено как множество звезд – кандидатов в состав скоплений, так и ранее неизвестных скоплений [6]. Это позволило увеличить число каталогизированных скоплений приблизительно до 10 тысяч. [7].

Обнаружение шлейфов, состоящих из звезд, покинувших РЗС и распределенных вдоль орбиты скопления (см., например, [8], [9]), пролило свет на механизм динамической эволюции РЗС. Последовало лавинообразное нарастание публикаций о рассеянных звездных скоплениях, так как такие структуры были обнаружены у многих РЗС, (см. например, [10]).

Сценарий, или схема эволюции ([11], [3]) звездных ассоциаций и скоплений позволил рассматривать выбранные объекты в последовательности эволюционных стадий, характеризующихся набором параметров, включая пространственную форму РЗС. Для этого был взят ряд скоплений, укладывающихся на различные стадии эволюционного сценария – с одной стороны, и с другой стороны, с наиболее надежными данными наблюдений. Последнему требованию, очевидно, соответствуют наиболее близкие к Солнцу скопления, такие как Плеяды, Гиады, а также поток Большой Медведицы. Мы рассмотрели РЗС, явно и неявно связанные с потоками и звездными ассоциациями. Разнообразие объектов позволяет понять возможные связи в последовательности эволюционных изменений звездных скоплений. В Таблице 1. приводятся названия этих скоплений, тип, возраст и расстояние от Солнца. Представлены объекты

на широком интервале возрастов, анализируя которые по единой методике, можно проследить эволюцию их пространственной формы.

Таблица 1. Объекты, выбранные для изучения

| Название | Тип объекта | Возраст, млн. лет | Расстояние, пк |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------|
| Cr 135 | РЗС+ гало | 50 | 280 |
| UBC 7 | РЗС+ гало | 50 | 300 |
| IC 2391 | РЗС+поток+ассоциация Аргус? | 50–250 | 142 |
| Плеяды | РЗС+поток | 115 | 136 |
| Гиады | РЗС+шлейфы+поток Геркулеса? | 625 | 46 |
| Поток Большой Медведицы | поток с остатками РЗС? | 400-600 | 20-200 |
| NGC 2158 | РЗС | $2 \cdot 10^3$ | 4690 |

Некоторые комментарии к Таблице 1.

Скопление Гиады и поток звезд наблюдаются давно, имеют сходную кинематику, но различный химический состав и возраст (см. работу [12], где сделан вывод о резонансной природе потока, представляющего собой смесь малометаллических звезд поля и звезд, потерянных скоплением). Если возраст Гиад составляет приблизительно 625 млн. лет [13], то возраст потока значительно больше (~1 млрд. лет), что свидетельствует об их различных стадиях эволюции или, вполне вероятно, случайной встрече. Также в работе Röser et al. [14] были обнаружены обильные приливные шлейфы из звезд, ранее принадлежавших скоплению.

Поток Большой Медведицы интересен не только тем, что это звездный поток, свободный от скоплений, но и тем, что он: 1) кинематически неоднороден и 2) полезен при изучении экзопланет, так как имеет надежные оценки возраста. Этот поток, по всей вероятности, является звездной ассоциацией, то есть группой звезд, скорее всего

родившихся вместе, но не связанных гравитацией, однако имеющих схожую кинематику. Кинематическая неоднородность, присутствующая внутри потока, предположительно образована распавшимися скоплениями.

Рассеянное скопление IC 2391 удобно для изучения своим близким расположением и низким покраснением, а также интересно соседствующим с ним одноименным звездным потоком. Поток IC 2391 включает 60 – 63 звезд южного неба. Сформировались поток и скопление, вероятно, одновременно и продолжают двигаться в пространстве в направлении созвездия Зайца (Lepus). Вполне возможно, что в пространстве рядом со скоплением IC 2391 (Caldwell 85), как и у Гиад, расположена звездная группа с возрастом почти на порядок отличающимся от возраста скопления. Возникает вопрос о происхождении близких по кинематике, но отличных по возрасту потоков и РЗС. Поскольку в диске пространственные движения по преимуществу круговые, то такие совпадения могут иметь случайный характер.

Скопления Collinder 135 и UBC 7 молодые и, возможно, не обрели приливных шлейфов. Они достаточно компактные и образуют пару (их центры находятся на расстоянии 24 пк друг от друга). Однако вокруг них имеется общее гало из звезд, примерно равное общей массе обоих скоплений. Это гало расширяется и, скорее всего, возникло после потери газа из скоплений за счет звезд, потерявших с ними тесную гравитационную связь.

Цели диссертационной работы

1. Выбрать и изучить скопления, находящиеся на различных эволюционных стадиях, по наиболее достоверным данным наблюдений. В их число входят близкие скопления различного возраста. Надежные данные наблюдений позволяют минимизировать ошибки различных параметров объекта исследования, наиболее полно и достоверно отобрать его звездных членов и получить исчерпывающую информацию о нем;
2. Для выбранных рассеянных звездных скоплений, потоков и ассоциаций на основе наиболее надежных и точных данных получить их параметры, особо выделяя характеристики пространственной структуры. Последняя наиболее подвержена заметным изменениям в ходе эволюции. Сделать вывод о стадии эволюции, оценить их пространственно-кинематические параметры и связь с потоками и ассоциациями;
3. На основе полученных характеристик выбранных скоплений и ассоциаций разного возраста и формы проследить эволюцию таких объектов. Понять их место в выбранной схеме эволюции.

Основные положения, выносимые на защиту

1. По выполненному всенебесному анализу найдено 9 пар – кандидатов в гравитационно связанные двойные скопления, из них 7 пар обнаружены впервые;
2. Составлен авторский список звезд, входящих в состав скопления IC 2391. По Gaia DR2 такой каталог построен впервые. Определены

физические характеристики скопления. Высказано предположение о совместном рождении скопления IC 2391 и одноименного потока;

3. По данным каталогов Gaia DR1 и RAVE DR5 получены физические характеристики скопления Плеяды: дисперсия скоростей, расстояние от Солнца, положение апекса, пространственная скорость;
4. По данным Gaia DR1 определены пространственно-кинематические параметры скопления Гиады. Впервые показана эллиптичность пространственной формы скопления с большой осью ориентированной вдоль галактической орбиты. Форма указывает на наличие приливных шлейфов, позже обнаруженных многими авторами по данным Gaia DR2;
5. Автором выполнен собственный отбор звезд, входящих в состав потока Большая Медведица, по данным Gaia DR1. Обнаружены новые кандидаты в члены потока. Подтверждена кинематическая неоднородность Большой Медведицы, состоящей из нескольких групп звезд. Предложена трактовка природы потока, как распадающейся звездной ассоциации;
6. По данным каталога Gaia DR2 определены пространственно-кинематические характеристики скопления NGC 2158 и его возраст.

Научная новизна

1. Для скопления Плеяды по Gaia DR1 получена независимая оценка расстояния по собственному списку звезд скопления.
2. Для NGC 2158 по собственному каталогу получены оценки возраста, расстояния по данным Gaia DR2.
3. Для IC2391 по нескольким спискам звезд, включая собственный, получены оценки возраста, параметры пространственной формы. Сделан вывод о принадлежности скопления и потока к распадающейся звездной ассоциации.
4. Для Гиад по данным Gaia DR1 обнаружена пространственная эллиптичность центральной части скопления, являющаяся признаком шлейфов, впоследствии обнаруженных другими авторами по данным Gaia DR2.
5. По результатам данной работы дополнен состав потока Большой Медведицы кандидатами, не упоминавшимися в работах других авторов.
6. Создан компилятивный каталог кандидатов в двойные звездные скопления. 7 пар скоплений из данного каталога были обнаружены впервые.

Научная и практическая значимость Представленные в диссертации результаты важны для понимания эволюции звездных скоплений и ассоциаций как одного из важнейших населений Галактики. Разработанная последовательность критериев для отбора членов скоплений позволит уточнять списки звезд скоплений при составлении

собственных каталогов. Представленные списки членов скоплений и определенные в работе параметры могут быть использованы для изучения эволюции, формы и кинематики Галактики, а также для моделирования различных динамических процессов, исследования связи звездных структур и структуры газа. Полученные параметры скоплений могут использоваться для дальнейшего и более глубокого их изучения. Например, для расчетов орбит, моделей динамики, поиска новых членов, а также для изучения химического состава РЗС.

Методология и методы исследования Большая часть задач решалась с использованием как классических методов отбора звезд скопления, так и разработанных нами, [15, 16]. Для моделирования влияния ошибок наблюдений на результаты использовался метод Монте-Карло. Результаты были получены и проанализированы с помощью авторского программного обеспечения.

Достоверность представленных результатов Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается применением проверенных методов и обоснованным выбором объектов исследования, данных наблюдений и методов обработки, прошедших апробацию, а также согласованностью с опубликованными результатами других авторов и обсуждением полученных результатов на Российских и международных конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы Результаты диссертации были представлены на российских и зарубежных конференциях и семинарах в качестве устных и стендовых докладов:

1. Постникова Е.С., Чупина Н.В., Верещагин С.В. Скопления в каталоге MWSC II движущиеся к полюсам Галактики. Международная конференция. «Современная звездная астрономия – 2017», г. Екатеринбург, Россия, 14-16 июня 2017 г.
2. Верещагин С.В., Постникова Е.С. Накопление новых знаний о внутреннем устройстве рассеянных звездных скоплений на основе интенсивного использования данных. XIX Международная конференция «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных» DAMDID/RCDL'2017, г. Москва, Россия, 10-13 октября 2017 года.
3. Vereshchagin S. V., Chupina N. V., Postnikova E. S. What will lead the astrometry data accuracy breakthrough in the study of star clusters? XX International Conference «Data Analytics and Management in Data Intensive Domains» (DAMDID/RCDL'2018), Moscow, Russia, October 9-12, 2018.
4. Постникова Е.С., Чупина Н.В., Верещагин С.В.. Субструктуры в некоторых рассеянных звездных скоплениях. Конференция «Звезды и спутники», посвященная 100-летию со дня рождения проф. Масевич А. Г., г. Москва, Россия, 15-16 октября 2018 г.
5. Постникова Е.С., Чупина Н.В., Верещагин С.В.. Параметры 19 рассеянных звездных скоплений по данным каталога Gaia DR2. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия – 2018», г. Москва, Россия, 22-26 октября 2018 г.
6. Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В.. Пространственно-кинематические свойства потока IC 2391 по данным Gaia.

Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия – 2018», г. Москва, Россия, 22-26 октября 2018 г.

7. Postnikova E. S. Binary open cluster Collinder 135 and UBC7. BASIS Foundation Summer School 2019 «Evolution of galaxies and stars», г. Сочи, Россия, 15-27 июля 2019 г.
8. Postnikova E. S. The search for candidates for double open clusters in the Galaxy. 6-th Gamow International Conference in Odessa «New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow», Odessa, Ukraine, August 11-18, 2019
9. Постникова Е.С. Исследование рассеянного звездного скопления Плеяды по данным Gaia DR2. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия – 2019», п. Нижний Архыз, Россия, 7-11 октября 2019 г.
10. Постникова Е.С. Приливные образования в области звездного скопления Плеяды. XX Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology», Odessa, Ukraine, August 10-16, 2020.

Личный вклад автора Автор принимала активное участие в постановке задачи, подборе и обработке наблюдательных данных, проведении численных расчетов, моделировании, а также в обсуждении полученных материалов, их подготовке к публикации. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором в результате совместных исследований, опубликованных с соавторами в научных статьях.

В частности, автором:

1. Составлен каталог звезд скопления IC2391.
2. Определена и проанализирована форма скоплений IC2391, Гиады и Плеяды.
3. Обнаружено 7 пар – кандидатов в двойные звездные скопления.
4. Поток Большой Медведицы дополнен новыми членами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Число страниц в диссертации 153, рисунков 35, таблиц 19. Список литературы содержит 243 наименования. По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 6 входит в перечень ВАК.

Содержание работы

Во **Введении** представлен краткий обзор предмета исследования и содержания диссертационной работы. Описаны актуальность диссертационной работы, ее цели и задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований автора и его вклада в работу.

В **Главе 1** представлен используемый сценарий, по которому идет эволюция звездных скоплений, потоков и ассоциаций и источники данных, как о скоплениях, так и о звездах, из которых они состоят.

Продолжительность существования скопления обусловлена местом, где оно родилось, а также внутренними процессами и влиянием внешних сил Галактики, в результате которых звезды постепенно покидают его, скопление растягивается, образуя шлейфы из звезд, и постепенно рассеивается по всей Галактике. Эволюция звездных ассоциаций идет схожим образом, но ассоциации включают в себя звезды и скопления, которые в процессе жизни отдаляются друг от друга и постепенно распадаются.

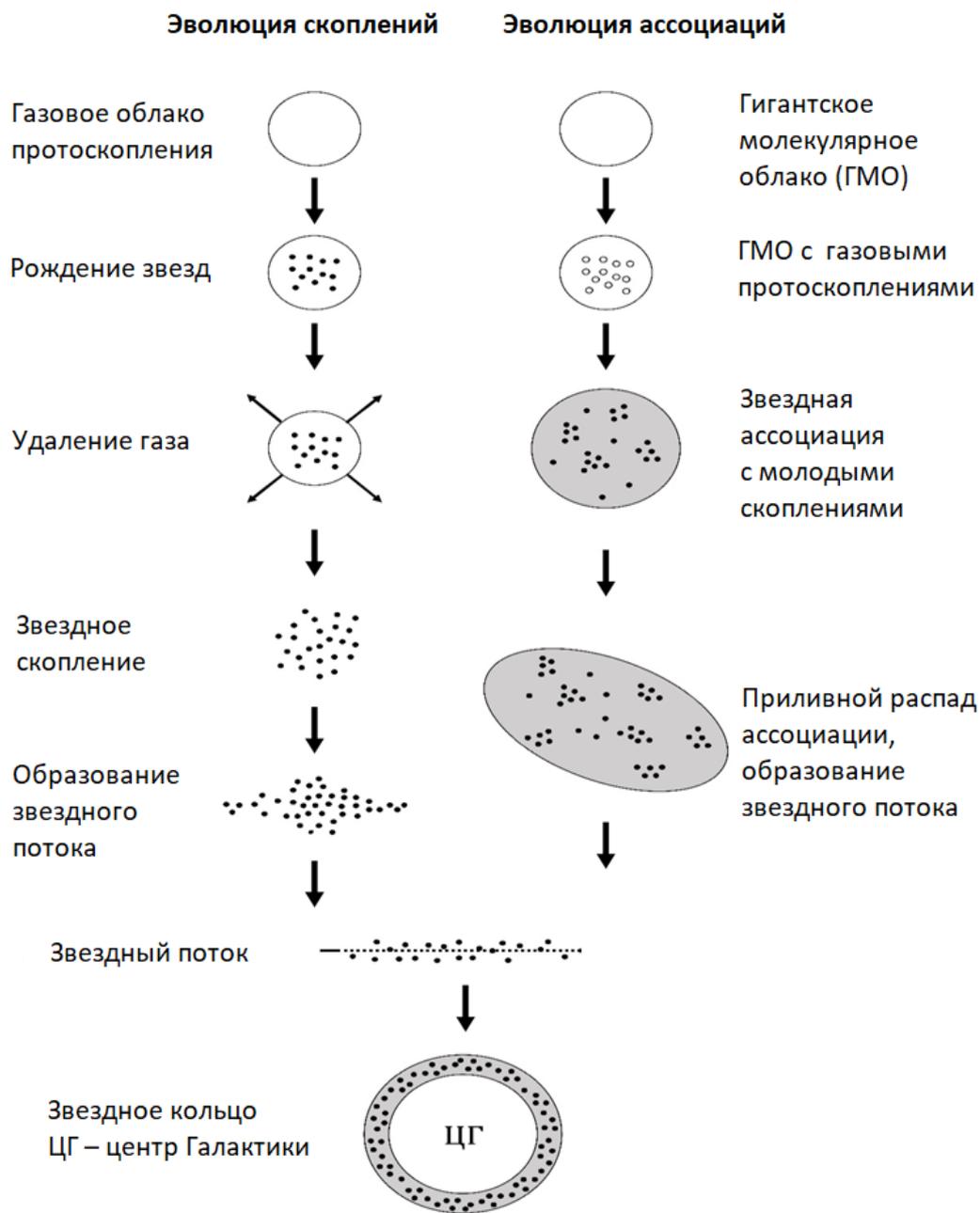


Рис.1. Используемая схема эволюции звездных скоплений (левая ветка) и звездных ассоциаций (правая ветка) [3]. Показаны последовательные стадии эволюции. Точками схематично обозначена звездная составляющая, группами точек – скопления, полыми кружками – протоскопления.

В работе использованы различные каталоги, которые наилучшим образом подходили для поставленных задач, а также составлены собственные каталоги звезд скоплений. Основные результаты получены с помощью данных миссий Hipparcos и Gaia. Используются не только каталоги звезд, но и каталоги скоплений. Каталог «Milky Way Global Survey of Star Clusters» (MWSC) [4] содержит данные о 3784 скоплениях, для 953 из них есть данные о лучевых скоростях. Каталог «Gaia DR2 open clusters in the Milky Way» [6] включает 1229 скоплений нашей Галактики (в том числе 60 новых рассеянных скоплений).

В данной главе представлено описание процесса формирования скоплений, потоков и ассоциаций, их структуры включая процесс распада. Дана общая схема эволюции звездных скоплений и ассоциаций (см. Рис.1). Рассмотрены особенности появления парных звездных скоплений, а также возможность формирования экзопланет в РЗС. Так же описаны использованные источники данных и принципы создания собственных каталогов звезд скоплений.

Глава 2 посвящена исследованию и поиску двойных звездных скоплений.

В данной главе рассмотрены два молодых скопления Cr 135 и UBC 7, которые возможно представляют собой гравитационно-связанную пару скоплений. Оба скопления являются ровесниками, имеют схожие физические характеристики, близко расположены на небе, также близко находятся и их приливные радиусы, а внешние части (корона) соприкасаются. Нахождение этих двух скоплений рядом и достаточно молодой (возраст примерно 50 млн. лет) дает возможность предположить, что они сформировались вместе, и пока еще не были разлучены или слиты под воздействием сил Галактики. Чтобы понять природу

возникновения этой пары и ее физические свойства, необходимо получить параметры скоплений и на их основе изучить уже данные объекты. Для этой цели был произведен отбор звезд скоплений, разделение членов между ними и определение основных характеристик на базе отнесенных к ним звезд. Как показывают модели, совместное рождение из одного облака и даже изначальная физическая гравитационная связь возможна для этой пары во многих сценариях.

Достаточный интерес представляет также поиск и детальное исследование таких пар. Было решено составить свой каталог кандидатов в двойные звездные скопления, так как за последние годы было открыто много новых скоплений по высокоточным данным Gaia, некоторые из них найдены рядом с уже известными скоплениями. Основными параметрами, позволяющими судить о природе физической связи скоплений в парах, являются параметры δV и δR (разность пространственных скоростей и расстояние между центрами скоплений), а также масса и их положение в Галактике. Двойные скопления должны быть устойчивы относительно ее приливных сил. Найдены несколько пар скоплений, которые перспективны для дальнейшего изучения, чтобы рассмотреть предположение об их двойственности. Также определенный интерес вызывают звездные группы, расстояние между которыми не превышает 100 пк. Скорее всего, эти объекты принадлежат одной и той же ассоциации, то есть могут иметь общее происхождение. Но большое расстояние между ними исключает гравитационную связь.

В данной главе рассмотрены результаты поиска двойных звездных скоплений различными авторами, а также приведены физические параметры скоплений, удовлетворяя которым, они будут считаться двойными в этой диссертации. В свою очередь детально изучена пара

близкорасположенных скоплений Cr 135 и UBC 7, определены их параметры и приведены гипотезы образования. Кроме того, составлен список кандидатов в двойные скопления, сформированный на основе данных Gaia. Основные результаты опубликованы в работах [A5], [A6] и [B5].

Глава 3 посвящена скоплениям на ранних стадиях эволюции, к которым здесь отнесены IC 2391 и Плеяды.

Звездное скопление IC 2391 – это близкая молодая группа звезд, неподалеку от которой расположен одноименный поток со схожей кинематикой. Была исследована кинематика и внешний вид этих объектов на основе выборок [6] и [17], а также сделана собственная выборка звезд скопления, одной из целей которой был поиск относительно слабых звезд для получения наиболее полной информации о свойствах скопления. Аппроксимация пространственной формы рассматриваемых звездных групп эллипсоидами позволила уточнить направление вытянутости потока и скопления в диске – обе структуры растягиваются по направлению к ЦГ. В рамках ряда предположений произведена оценка возможности совместного формирования потока и скопления в контексте общей схемы эволюции РЗС и звездных ассоциаций, а также и возможное место образования этих объектов. Насчет родственной связи потока и РЗС IC 2391, высказана гипотеза, основанная на расчетах орбит назад во времени о том, что они могли родиться в одном звездном комплексе. Тот объем, который занимали эти звездные группы в момент их формирования, с учетом приблизительно одинаковых возрастов объектов, не превышает объем пространства, характерный для звездной ассоциации. Возможно, что скопление и поток

образовались в один этап звездоформирования, которым было охвачено их родительское облако.

Для скопления Плеяды выполнен кинематический анализ и определены основные характеристики, такие как: положение апекса скопления, расстояние до скопления и пространственная скорость. С целью определения пространственно-кинематических параметров Плеяд использован актуальный на момент проведения исследования каталог TGAS [18], к данным которого были присоединены лучевые скорости из RAVE DR5 [19]. Также были использованы данные каталогов Hipparcos [20] и Hipparcos-2 (HIP New) [21] с добавленными к ним лучевыми скоростями из базы данных SIMBAD [22]. . Это позволило сравнить старые и новые данные между собой и посмотреть, насколько изменились параметры скопления с появлением данных TGAS, также оценить дисперсию скоростей по всем трем наборам данных. Основные результаты опубликованы в работах [A1] и [A3], а также [B3], [B6].

Глава 4 посвящена скоплениям, находящимся на поздних стадиях эволюции. В этом случае становится заметно влияние приливных сил Галактики на форму и движение звезд.

В данной главе рассматривается кинематика и физические параметры скопления Гиады – одного из самых близких к нам звездных скоплений. Это скопление уже достаточно старое (возраст 600 – 750 млн. лет) и совершило не один оборот вокруг центра Галактики, что могло повлиять на его параметры, в том числе на пространственную форму скопления. Оценка пространственно-кинематической структуры Гиад произведена с помощью метода AD-диаграмм [15, 16]. Обнаружена вытянутость ядра приблизительно в направлении на центр Галактики и неоднородность кинематики.

Также в этой части работы рассмотрена природа потока Большой Медведицы. Этот поток, обнаруженный почти 150 лет назад, остается одним из пяти главных потоков в околосолнечных окрестностях и привлекает постоянное внимание исследователей. Его возраст близок к возрасту Гиад, но это более проэволюционировавшая структура. Ранее в потоке по данным Hipparcos обнаружены три кинематические группы и обособленное ядро, отличающиеся направлениями векторов пространственных скоростей на диаграмме апексов (AD-диаграмме), и, по данным Gaia эти неоднородности сохраняются. Проведен поиск кандидатов в члены потока.

Самое старое скопление исследуемое в данной работе – NGC 2158. Его возраст составляет примерно 2-3 млрд. лет. Это далекое скопление расположено в направлении антицентра Галактики и, к тому же, достаточно высоко относительно ее плоскости. Изучение такого объекта интересно в плане влияния гравитационного поля Галактики на изменения его формы. Для этого сделана выборка звезд в широкой области вокруг центра скопления, чтобы выявить максимально возможное число членов скопления и более подробно изучить изменения, происходящие в его внешних частях. Также был определен его возраст и расстояние фотометрическим способом. Основные результаты опубликованы в работах [A2] и [A4], а также [B1], [B2], [B4].

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы. Даны рекомендации для дальнейшего развития темы диссертации.

В **Приложениях 1 и 2** даны дополнительные материалы по Главе 3 и Главе 4, соответственно.

Публикации по теме диссертации:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- [A1] Elsanhoury W. H., Postnikova E. S., Chupina N. V., Vereshchagin S. V., Sariya Devesh P., Yadav R. K. S., Jiang Ing-Guey. The Pleiades apex and its kinematical structure // *Astrophysics and Space Science*. – 2018. – Vol. 363, Issue 3, article id. 58. – P.13.
- [A2] Верещагин С.В., Чупина Н.В., Постникова Е.С. Кинематические группы в короне потока Большой Медведицы по данным ИСЗ Gaia // *Астрономический журнал*. – 2018. – Т.95, № 8. – С.530–541.
- [A3] Postnikova E. S., Elsanhoury W. H., Devesh Sariya P., Chupina N. V., Vereshchagin S.V., Ing-Guey Jiang. The kinematical and space structures of IC 2391 open cluster and moving group with Gaia-DR2 // *Research in Astronomy and Astrophysics*. – 2020. – Vol 20, Issue 2, article id.016. – P.10.
- [A4] Sariya Devesh P., Jiang Ing-Guey, Sizova M. D., Postnikova E. S., Bisht D., Chupina N. V., Vereshchagin S. V., Yadav R. K. S., Rangwal, G., Tutukov A. V. A Comprehensive Analysis of NGC 2158 in the Gaia Era: Photometric Parameters, Apex, and Orbit // *The Astronomical Journal*. – 2021. – Volume 161, Issue 3, article id.101. – P.12.
- [A5] Kovaleva D. A., Ishchenko M., Postnikova E.S., Berczik P., Piskunov A.E., Kharchenko N.V., Polyachenko E.V., Reffer S., Sysoliatina K., Just A. Collinder 135 and UBC7: A physical pair of open clusters // *Astronomy & Astrophysics*. – 2020. – Vol. 642, article id.L4. – P.5.
- [A6] Верещагин С. В., Тутуков А.В., Чупина Н.В., Постникова Е.С., Сизова М.Д., Двойные скопления: теория и наблюдения // *Астрономический журнал*. – 2022. – Т. 99. – №5 – С.355-382.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] Верещагин С.В., Постникова Е.С. Накопление новых знаний о внутреннем устройстве рассеянных звездных скоплений на основе интенсивного использования данных // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: сборник научных трудов XIX Международной конференции DAMDID/RCDL'2017 (10–13 октября 2017 года, г. Москва, МГУ, Россия), под ред. Л.А. Калиниченко, Я.Манолопулос, Н.А. Скворцова, В.А. Сухомлина. Москва: ФИЦ ИУ РАН. – 2017.
- [B2] Vereshchagin S.V., Postnikova E. S. Aggregation of Knowledge on Star Cluster Structure and Kinematics // «Data Analytics and Management in Data Intensive Domains». – 2018. – P.113-127.
- [B3] Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В. Параметры 19 рассеянных звездных скоплений по данным каталога Gaia DR1 // Сб. трудов конференции «Звезды и спутники», посвященной 100-летию со дня рождения Масевич А.Г., Ред. Шустов Б.М., Вибе Д.З., Москва, Янус-К. – 2018. – С.235-240
- [B4] Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В. Изучение кинематики звезд в скоплении Гиады методом AD-диаграмм. В Сб. трудов конференции «Звезды и спутники», посвященной 100-летию со дня рождения Масевич А.Г., Ред. Шустов Б.М., Вибе Д.З., Москва, Янус-К. – 2018. – С.228-234
- [B5] Vereshchagin S.V., Chupina N.V., Postnikova E.S. What will lead the astrometry data accuracy breakthrough in the study of star clusters? // Proceedings of the XX International Conference “Data Analytics and

Management in Data Intensive Domains” (DAMDID/RCDL’2018), Moscow, Russia, October 9-12, 2018, eds. L.A. Kalinichenko et al. Москва. – 2018

[B6] Постникова Е.С., Чупина Н.В., Верещагин С.В. Каталог звезд скопления IC 2391 // Научные труды Института астрономии РАН. – 2019. – Т.3. – С.336-341

Цитируемая литература

1. Piskunov A. E., Kharchenko N. V., Röser S., Schilbach E., Scholz R. -D. Revisiting the population of Galactic open clusters // *Astronomy and Astrophysics*. – 2006. – Vol. 445, Issue 2. – P.545-565
2. Vereshchagin S. V., Postnikova E. S. What Will Lead the Astrometry Data Accuracy Breakthrough in the Study of Star Clusters? // *Proceedings of the Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, XIX International Conference, DAMDID/RCDL 2017*. – 2018. – P.107-111.
3. Тутуков А.В, Сизова М.Д., Верещагин С.В. Образование звездных потоков в ходе распада звездных скоплений, OB ассоциаций и спутников галактик // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т.97.– С. 820-832.
4. Kharchenko N. V., Piskunov A. E., Schilbach E., et al. Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters // *Astronomy and Astrophysics*. – 2013. – Vol. 558, article id. 53 – P.8.
5. WEBDA database [Электронный ресурс]. - URL: <https://webda.physics.muni.cz/>

6. Cantat-Gaudin T., Jordi C., Vallenari A., et al. A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way // *Astronomy and Astrophysics*. – 2018. – Vol. 618, article id. A93. – P.16.
7. Bica E., Pavani D. B., Bonatto C. J., Lima E. F. A Multi-band Catalog of 10978 Star Clusters, Associations, and Candidates in the Milky Way // *The Astronomical Journal*. – 2019. – Vol. 157. – P.12.
8. Röser S., Schilbach E., Goldman B. Hyades tidal tails revealed by Gaia DR2// *Astronomy and Astrophysics*. – 2019. – Vol. 621, article id. L2. – P.5.
9. Meingast S., Alves J. Extended stellar systems in the solar neighbourhood. I. The tidal tails of the Hyades // *Astronomy and Astrophysics*. – 2019. – Vol. 621, article id. L3. – P.6.
10. Lodieu N., Pérez-Garrido A., Smart R. L., Silvotti R. A 5D view of the α Per, Pleiades, and Praesepe clusters // *Astronomy and Astrophysics*. – 2019. – Vol. 628, article id. A66. – P.26.
11. Tutukov A.V. Early stages of dynamical evolution of star cluster models // *Astronomy and Astrophysics*. – 1978. – Vol. 70. – P. 57-61.
12. Famaey B., Pont F., Luri X., Udry S., Mayor M., Jorissen A. The Hyades stream: an evaporated cluster or an intrusion from the inner disk? // *Astronomy and Astrophysics*. – 2007. – Vol. 461. – P. 957-962.
13. Perryman M. A. C., Brown A. G. A., Lebreton Y., Gomez A, et al., The Hyades: distance, structure, dynamics, and age // *Astronomy and Astrophysics*. – 1998. – Vol. 331 – P.81-120.
14. Röser S., Schilbach E. Praesepe (NGC 2632) and its tidal tails // *Astronomy and Astrophysics*. – 2010. – Vol. 627, article id. A4. – P.6.

15. Chupina N. V., Reva V. G., Vereshchagin S. V. The geometry of stellar motions in the nucleus region of the Ursa Major kinematic group // *Astronomy and Astrophysics*. – 2001. – Vol. 371 – P.115-122
16. Chupina N. V., Reva V. G., Vereshchagin, S. V. Kinematic structure of the corona of the Ursa Major flow found using proper motions and radial velocities of single stars // *Astronomy and Astrophysics*. – 2006. – Vol. 451, Issue 3. – P.909-916
17. Montes D., Lopez-Santiago P. J., Galvez M. C., Fernandez-Figueroa M. J., De Castro E., Cornide M. Late-type members of young stellar kinematic groups - I. Single stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2001. – Vol 328, Issue 1. – P.45-63
18. Brown A.G.A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J. H. J., Mignard F. et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. – 2016. – Vol. 595, article id. A68. – P.23.
19. Kunder A., Kordopatis G., Steinmetz M., Zwitter T. et al. The Radial Velocity Experiment (RAVE): Fifth Data Release // *The Astrophysical Journal*. – 2017. – Vol. 153, Issue 2, article id. 75. – P.30.
20. ESA, ed., The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission // *ESA Special Publication*. – 1997. – Vol.1200.
21. van Leeuwen F. Parallaxes and proper motions for 20 open clusters as based on the new Hipparcos catalogue // *Astronomy and Astrophysics*. – 2009. – Vol. 497. – P. 209-242.

22. Wenger M., Ochsenbein F., Egret D. et al. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // Astronomy and Astrophysics Supplement. - 2000. - Vol.143. - P.9-22

Благодарности Диссертант выражает благодарность С. В. Верещагину и Н.В. Чупиной за научное руководство, а также благодарит своих коллег и соавторов, в особенности Девеша Сарья П. (Sariya Devesh P.), Д. А. Ковалеву, А. Э. Пискунова и А. П. Демидова, за помощь в работе и плодотворное сотрудничество.