

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Ялялиева Лидия Наилевна

**Изучение структуры и кинематики рассеянных звездных
скоплений в окрестностях Солнца**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
доцент
Глушкова Елена Вячеславовна

Москва — 2024

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Исследование окрестности ассоциации Sco OB1	12
1.1 Наблюдения и обработка данных	13
1.2 Анализ данных, физические группы и их свойства	19
1.2.1 Алгоритм кластеризации	20
1.2.2 Фотометрические расстояния	22
1.2.3 Астрометрические расстояния	22
1.2.4 Возраст	24
1.2.5 Среднее собственное движение	25
1.2.6 Свойства найденных групп	25
1.3 Звезды до главной последовательности	28
1.4 Выводы	30
Глава 2. Исследование рассеянного звездного скопления NGC 225	38
2.1 Вероятность членства звезд в скоплении	40
2.2 Отличие от данных Gaia EDR3	43
2.3 Наблюдения и обработка данных	44
2.3.1 Фотометрические наблюдения	44
2.3.2 Спектроскопические данные	47
2.4 Доля двойных звезд и средняя лучевая скорость	48
2.5 Модуль расстояния и возраст	51
2.6 Масса скопления	55
2.6.1 Доля двойных звезд $\alpha = 0$	57
2.6.2 Доля двойных звезд $\alpha = 0.52$	57
2.7 Выводы	60
Глава 3. Исследование рассеянных звездных скоплений FSR 866, NGC 1960 и Stock 2	62
3.1 Алгоритм кластеризации	64

	Стр.
3.2 Фотометрическое расстояние и возраст	67
3.3 Доля двойных звезд по фотометрическим данным	68
3.4 Спектроскопические наблюдения и обработка данных	75
3.5 Лучевые скорости и идентификация по двойным звездам по спектроскопическим данным	76
3.6 Сравнение лучевых скоростей с данными Gaia DR3	78
3.7 Доля двойных звезд по спектроскопическим данным	79
3.8 Выводы	80
Заключение	89
Благодарности	91
Список литературы	92
Приложение А. Двухцветные диаграммы и диаграммы «цвет-звездная величина» найденных групп в окрестностях Sco OB1	105
Приложение Б. Список звезд – членов скопления NGC 225	107
Приложение В. Список звезд – членов скопления FSR 866	111
Приложение Г. Список звезд – членов скопления NGC 1960	113
Приложение Д. Список звезд – членов скопления Stock 2	115

Введение

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Рассеянные звездные скопления (РЗС) принадлежат плоской подсистеме нашей Галактики, объекты которой характеризуются малой дисперсией скоростей и металличностью, близкой к солнечной. Их изучение не теряет **актуальности** по многим причинам.

Характеристики рассеянных скоплений охватывают широкий диапазон возрастов, масс, светимостей и металличностей, они распределены по всему диску Галактики, что делает их ценными объектами для изучения эволюции диска, как динамической, так и химической ([1]). Относительная простота и надежность, с которой по фотометрии можно определить их важнейшие физические характеристики, такие как возраст и расстояние, делают их удобными объектами для исследования структуры нашей Галактики ([2–4]), а исследование кинематики позволяет изучать процессы нагрева Галактического диска ([5]) и радиальной миграции ([6]). Рассеянные звездные скопления являются популярными объектами для исследования градиента металличности Млечного Пути [7–11]. Также звездные скопления часто используют для оценки качества данных больших каталогов, таких как, например, Gaia ([12]).

Тема рассеянных звездных скоплений неразрывно связана с исследованием областей звездообразования. Наряду со звездными комплексами и ОВ ассоциациями, РЗС являются одной из ступеней иерархии звездообразования, и изучение данных объектов вносит большой вклад в понимание эволюции этих областей. Действительно, в рассеянных звездных скоплениях и ассоциациях рождается большинство звезд Галактического диска и поэтому исследование данных объектов позволяет проследить эволюцию не только индивидуальных областей звездообразования, но и всего диска как целого [4; 13]. Актуальность таких исследований возросла в последнее десятилетие с появлением массовых высокоточных данных для звезд в полях РЗС.

Одна из сложностей, с которой можно столкнуться при исследовании РЗС, состоит в том, что в отличие от шаровых звездных скоплений они не всегда явно концентрируются к своему центру и характеризуются меньшим числом звезд в своем составе. Более того, среда в окрестностях скоплений может быть неоднородной по своим свойствам, что приводит к дифференциальному поглощению

и, как результат, получению разных значений параметров (таких как избыток цвета и видимый модуль расстояния) для разных частей скоплений. Также скопления могут распадаться, например, под действием приливных сил, рассеивая свои звезды в окружающем пространстве. Все вышесказанное ведет, с одной стороны, к *необходимости* тщательного отбора вероятных членов скопления, а с другой, к *возможности* восстановления сложной структуры распределения звезд, имеющих общую историю образования, если такой инструмент отбора создан.

Другой проблемой является то, что наши знания о рассеянных звездных системах далеко не полны, в основном из-за отсутствия качественных и статистически значимых наблюдательных данных. Например, редкой и ценной для определения параметров звездных скоплений является фотометрия в фильтре *U*. То же можно сказать и о лучевых скоростях - надежные средние лучевые скорости доступны для очень небольшого числа рассеянных звездных скоплений, что препятствует изучению их внутренней кинематики и динамики. Кроме того, информация о лучевых скоростях нужна для построения орбит, которые, в свою очередь, важны для изучения кинематики диска Галактики, к которому принадлежит подсистема РЗС. Большие надежды в отношении получения точных лучевых скоростей связаны с миссией Gaia. Многие массовые каталоги, в которых представлены параметры скоплений, основаны на данных Gaia DR2 [14] (релиз Gaia EDR3 [15] не содержал новых лучевых скоростей по сравнению с релизом Gaia DR2 [14]), чьи точности и количество звезд, для которых они определены, в большинстве случаев недостаточны для получения надежных средних лучевых скоростей скоплений. Например, в каталоге, содержащем средние лучевые скорости для 861 РЗС по данным Gaia DR2 [16], для 60% скоплений оценки средних лучевых скоростей сделаны по трем или даже меньшему числу звезд. В каталоге [17] средние лучевые скорости определены уже для большего числа рассеянных звездных скоплений, а именно для 1382 объектов, однако процент РЗС, для которых в расчетах использовались три и меньшее число звезд остался практически тем же - 58%. С релизом Gaia DR3 [18] ситуация улучшилась - данный релиз содержит средние лучевые скорости для 33 миллионов звезд по сравнению с 7.2 миллионами 2-го релиза. Однако средние лучевые скорости следует анализировать с осторожностью, поскольку звезда может оказаться двойной. В этом случае для большей уверенности полезно иметь несколько измерений, проведенных в разные дни, и учитывать как индивидуальные из-

мерения, так и среднее значение за все дни и их разброс. Изучение двойных звезд важно для лучшего понимания эволюции скопления. Из теории хорошо известно, что они играют значительную роль в динамической эволюции родительского скопления: они усиливают сегрегацию звезд по массам, порождают «голубых бродяг» и другие экзотические системы, являются важным источником динамического нагрева. Моделирование показывает, что двойные системы могут сливаться и образовывать самые массивные звезды в скоплениях ([19]) или, будучи изначально массивными, могут выбрасываться из родительских скоплений ([20; 21]). Также их изучение важно для правильного определения массы скопления при вириальном равновесии ([22]).

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной работы является изучение рассеянных звездных скоплений как самостоятельных объектов, так и как структурных единиц в составе областей звездообразования, что подразумевает определение и уточнение таких основных физических параметров, как возраст, расстояние, собственное движение, звездный состав. При этом **объектом** исследования являются как сами рассеянные звездные скопления, так и их компоненты – звезды – члены скоплений.

Поставленная цель и обозначенные ранее проблемы приводят нас к следующим **задачам** данного исследования:

- разработать методы исследования структуры областей звездообразования;
- выполнить самостоятельные фотометрические и спектроскопические наблюдения для звезд – вероятных членов скоплений;
- рассмотреть способы оценки вероятности принадлежности звезд к тем или иным объектам этих структур, в частности, к рассеянным звездным скоплениям;
- найти/уточнить основные физические параметры этих объектов;
- получить, как из открытых источников, так и из собственных наблюдений, необходимые для исследования данные – астрометрические, фотометрические, спектральные;
- проанализировать полученные данные.

Научная новизна:

- Получены уникальные фотометрические данные для области в окрестности ассоциации Sco OB1 около PЗС Trumpler 24, а также для скопления NGC 225, включающие фотометрию в фильтре *U* и *B*.
- Найдены новые подструктуры в области ассоциации Sco OB1, описаны их физические характеристики, восстановлена картина процесса звездообразования в этой области.
- Получены лучевые скорости для звезд 4 рассеянных звездных скоплений: для 29 звезд скопления NGC 225, для 12 звезд FSR 866, для 14 звезд NGC 1960 и для 37 звезд Stock 2. Для многих из звезд лучевые скорости определены впервые.
- Впервые для PЗС NGC 225 определена доля двойных звезд и оценена масса скопления, разрешены встречающиеся в литературе противоречия относительно параметров скопления.
- Впервые для FSR 866, NGC 1960 и Stock 2 определены доли двойных звезд в составе скопления, разрешены встречающиеся в литературе противоречия относительно параметров скопления.

Научная и практическая значимость

Получены массивы новых наблюдательных фотометрических и/или спектральных данных для звезд в полях 4 PЗС и одной OB-ассоциации. Фотометрические величины этих звезд в разных фильтрах и их лучевые скорости могут быть использованы при различных исследованиях конкретных объектов. Разработаны и опробованы методы определения вероятности принадлежности звезды к скоплению, а также алгоритмы исследования структуры сложных объектов, таких как область звездообразования. Все эти методы и подходы могут быть применены при исследовании других подобных объектов. Уточнены или определены впервые основные физические параметры для рассеянных звездных скоплений NGC 225, FSR 866, NGC 1960 и Stock 2 и для структур в области скопления Trumpler 24, которые могут быть использованы при дальнейших исследованиях этих объектов.

Методология и методы исследования

В диссертации применялись как общенаучные методы исследования, такие как анализ, моделирование, дедукция, индукция, так и более узконаправленные - фотометрические и спектроскопические наблюдения, методы кластерного анализа, методы статистики (ядерная оценка плотности, критерий хи-квадра-

та). Для анализа данных использовались как общепризнанные в научной среде программы (такие как IRAF, DAOPHOT), так и реализованные автором с помощью пакетов языка программирования Python.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Реализованные на практике методы кластерного анализа, примененные к набору физических параметров звезд в области ассоциации Sco OB1 и молодого скопления Trumpler 24, позволяют выявить звездные группировки с различными свойствами и позволяют сделать выводы о наличии генетической связи между отдельными группами и протекании процессов звездообразования в исследуемой области.
2. Реализованный на практике метод определения принадлежности звезд к скоплению, основанный на широко используемом алгоритме кластерного анализа DBSCAN, позволяет надежно выделить члены рассеянных скоплений.
3. Физические параметры скоплений, определенные с использованием собственных фотометрических и спектральных наблюдений и извлеченных из каталога Gaia DR3, равны:
 - NGC 225: $\log(\text{Age/yr})=8.0-8.2$, расстояние 667 ± 18 пк, $V_r = -9.8 \pm 0.7 \text{ км с}^{-1}$;
 - FSR 866: $\log(\text{Age/yr}) = 9.57$, расстояние = 1330 пк, $V_r = 65.5 \pm 1.0 \text{ км с}^{-1}$;
 - NGC 1960: $\log(\text{Age/yr}) = 7.48$, расстояние = 1202 пк, $V_r = -18.9 \pm 1.4 \text{ км с}^{-1}$;
 - Stock 2: $\log(\text{Age/yr}) = 8.50$, расстояние = 463 пк.
4. Доля двойных звезд α , найденная по исследованию лучевых скоростей и/или по данным фотометрии, составляет в FSR 866 $\alpha = 0.33 - 0.50$, в NGC 1960 $\alpha = 0.31 - 0.44$, в Stock 2 $\alpha = 0.44$. Доля двойных звезд, найденная только по исследованию лучевых скоростей для скопления NGC 225, составляет $\alpha = 0.52$.
5. Масса скопления NGC 225, посчитанная по звездам вплоть до величины $G = 18^m.5$ Gaia EDR3, составляет от $\mathcal{M}_\alpha = 155.2 \pm 2.0 M_\odot$ («плоское» распределение отношений масс компонентов двойных) до $\mathcal{M}_\alpha = 170.5 \pm 2.2 M_\odot$ (случай равных по массе компонентов двойных звезд) с учетом доли двойных звезд, равной 0.52, и $\mathcal{M}_0 = 125.3 \pm 1.7 M_\odot$ без учета двойных звезд среди членов скопления.

Личный вклад

Автором выполнены спектральные наблюдения звезд скоплений NGC 225, FSR 866, NGC 1960 и Stock 2 за период с осени 2019 года по февраль 2020 года, обработаны спектральные наблюдения за 2019-2021 годы и из них извлечены лучевые скорости и идентифицированы спектральные классы звезд, обработаны фотометрические наблюдения для скопления NGC 225. Автором написаны все программы для определения вероятности принадлежности звезды к скоплению и для исследования структуры областей звездообразования, которые затем были применены для получения вероятностей членства звезд при исследовании области Sco OB1 вблизи P3C Trumpler 24, NGC 225 и скоплений FSR 866, NGC 1960 и Stock 2. Автором были получены основные физические параметры найденных в окрестности Trumpler 24 групп, проведен анализ этих параметров и выявлено разделение групп на два семейства. Также автором были найдены основные физические параметры (возраст, расстояние, избыток цвета, средняя лучевая скорость) P3C NGC 225, FSR 866, NGC 1960 и Stock 2, определена доля двойных звезд и для NGC 225 оценена масса скопления. Диссертация основана на статьях [23–26], личный вклад автора в которые можно оценить в 60-85 %.

Достоверность и обоснованность результатов

Диссертация опирается на методы и теории, описанные в прошедших рецензирование научных статьях и книгах, посвященных изучению рассеянных звездных скоплениях, анализу и обработке фотометрических и спектроскопических данных. В работе применялось широко используемое в научных работах программное обеспечение, такое как пакет программ IRAF и DAOPHOT, а также создавались программы на языке Python на основе хорошо известного алгоритма кластеризации DBSCAN. Методы, используемые для обработки наблюдательных данных, являются стандартными методами, признанными научным сообществом. Выводы, там где это возможно, сравнивались с опубликованными в рецензируемых журналах результатами исследования других авторов. Результаты данной работы прошли рецензию и опубликованы в ведущих научных журналах.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты изложены в 4 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **Yalyalieva, L.N.**, Chemel, A.A., Carraro, G., Glushkova, E.V. Binary Fraction in Galactic Star Clusters: FSR 866, NGC 1960, and Stock 2 // The Astronomical Journal. - 2024. — Т. 167, № 3. — id. 100. - Web of Science JIF2022=5.3. - Объем 1.32 печ. л. Личный вклад 85%.
2. **Yalyalieva, L.N.**, Glushkova, E.V., Munari, U., Ochner, P. The young galactic cluster NGC 225: binary stars' content and total mass estimate // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Т. 513, № 4. — С. 5299–5309. - Web of Science JIF2022=4.8. - Объем 1.32 печ. л. Личный вклад 85%.
3. **Ялялиева, Л.Н.**, Глушкова, Е.В., Карраро, Дж., Иконникова, Н.П., Гасымов, Д. Фотометрическое исследование рассеянного звездного скопления NGC 225 // Астрофизический бюллетень. - 2022. - Т. 77, № 1, С. 85-91. - Импакт-фактор РИНЦ 2018=0.945. - Объем 0.84 печ. л. // Переводная версия: **Yalyalieva, L.N.**, Glushkova, E.V., Carraro, G., Ikonnikova, N.P., Gasymov, D. Photometric study of the open cluster NGC 225 // Astrophysical Bulletin. — 2022. — Т. 77, № 1. — С. 78–83. - Web of Science JIF2022=1.2. - Объем 0.72 печ. л. Личный вклад 85%.
4. **Yalyalieva, L.N.**, Carraro, G., Vazquez, R., Rizzo, L., Glushkova, E.V., Costa, E. A new look at Sco OB1 association with Gaia DR2 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Т. 495, № 1. — С. 1349–1359. - Web of Science JIF2022=4.8. - Объем 1.32 печ. л. Личный вклад 60%.

Апробация работы

1. Всероссийская астрономическая конференция 2021 (ВАК — 2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, 23-28 августа 2021 года, *Многоканальное изучение рассеянного звездного скопления NGC 225 (устный)*.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет **116** страниц текста с **29** рисунками и **28** таблицами. Список литературы содержит **126** наименований на **13** страницах. **Содержание работы**

Во **Введении** описана актуальность темы, цели и задачи работы, научная новизна и методология, научная и практическая значимость исследования, до-

стоверность и обоснованность результатов, личный вклад автора, публикации и апробация результатов, а также положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена исследованию окрестности ассоциации Sco OB1 вблизи рассеянного скопления Trumpler 24. Описывается метод кластеризации, который был применен для выявления в этой области групп звезд с похожими физическими параметрами, а также получение и обработка фотометрических данных. Излагаются шаги по нахождению основных физических параметров исследуемых групп, рассматривается вопрос наличия большого числа звезд до главной последовательности. Делаются выводы о разделении групп на две подгруппы.

В **Главе 2** описывается исследование рассеянного звездного скопления NGC 225. Приводится обзор существующих данных о физических параметрах этого скопления. Описывается алгоритм выявления звезд – вероятных членов NGC 225, получения и обработки фотометрических и спектроскопических данных, определения физических параметров, таких как расстояние, возраст, средняя лучевая скорость. Описывается алгоритм определения двойных звезд по лучевым скоростям и оценка общей доли двойных звезд в скоплении. Дается оценка массы скопления и делается вывод о влиянии наличия двойных звезд на эту оценку.

В **Главе 3** излагается исследование трех довольно сильно отличающихся по своим параметрам друг от друга рассеянных скоплений - FSR 866, NGC 1960 и Stock 2. Также дается описание алгоритма определения вероятных звезд – членов скоплений, описывается обработка спектроскопических данных и нахождение физических параметров скоплений. Приводятся результаты нахождения лучевых скоростей звезд скоплений и спектральные типы этих звезд. Доля двойных звезд в скоплениях определяется двумя способами: на основе анализа полученных лучевых скоростей и по фотометрическим данным.

В **Заключении** представляются главные результаты диссертации, делаются основные выводы.

Глава 1. Исследование окрестности ассоциации Sco OB1¹

Согласно [27], большинство звезд формируется в относительно компактных скоплениях, насчитывающих более 100 членов. В этом сценарии звездные ассоциации, являющиеся разрозненными группами звезд ранних спектральных классов, интерпретируются как ранние стадии динамического распада звездных скоплений. Считается, что этот процесс, так называемая *детская смертность* (*infant mortality*), вызван звездным ветром и, вероятно, взрывами сверхновых. Таким образом звездные скопления формируются внутри молекулярных облаков как связанные структуры, но затем большая их часть быстро расширяется, и впоследствии скопление как целое постепенно исчезает.

Эта парадигма недавно была подвергнута сомнению в результате детального изучения близлежащих звездных ассоциаций с использованием данных Gaia DR2 [28]. На самом деле большинство ассоциаций не показывает признаков расширения, а результаты работы [29] не подтверждаются. Ассоциации представляют собой несвязанные совокупности звезд, значительная часть которых относится к спектральным классам O-B [30]. Можно говорить о наличии фрактальных структур [31], переходя от ассоциаций к агрегатам, а затем к звездным комплексам и суперкомплексам. В силу молодого возраста ассоциации несут отпечатки своего недавнего образования. Поэтому подробные исследования распределения отдельных звезд по координатам, скоростям и возрастам необходимы для изучения процессов формирования ассоциаций и, в свою очередь, для лучшего понимания процесса звездообразования [32].

Чтобы получить дополнительные сведения в рамках этой важной тематики мы исследовали область размером в один квадратный градус в окрестности ассоциации Sco OB1 с центром с координатами $\alpha = 253.97^\circ$, $\delta = -40.64^\circ$ (Рис. 1.1), для которой мы получили многополосную оптическую фотометрию.

Sco OB1 — очень богатая и сложная по структуре звездная ассоциация [33]. Обширная область III G345.45+1.50 расположена в северной части поля, а в его южной части находится наиболее заметное молодое звездное скопление NGC 6231 [34—37]. Мы не затрагиваем это скопление в нашем исследовании, а

¹Данная Глава диссертации написана на основе работы №4 из списка публикаций автора по теме диссертации.

концентрируемся на северном и центральном регионах. Здесь наиболее интересной структурой является Trumpler 24. Считается, что это молодое рассеянное скопление с плохо определенными границами и сложной структурой, принадлежащее Sco OB1 [38]. Кроме того, исследуемая область богата звездами на стадии, предшествующей главной последовательности [33; 38], что указывает на активное/недавнее звездообразование.

Из-за наличия в данной области большого количества неравномерно распределенного газа, вызывающего значительное дифференциальное покраснение, одной фотометрии недостаточно для идентификации известных и/или неизвестных звездных групп и описания их населения. Поэтому мы дополнили наш набор фотометрических данных высококачественными астрометрическими данными Gaia DR2 [14]. Недавно был создан ряд специальных инструментов и подходов для поиска групп и определения вероятности членства, включая методы кластеризации [39] и алгоритмы обучения без учителя [40; 41]. При этом входные данные могут быть разных типов: исследователи могут использовать только фотометрию [4], только астрометрию [42] или комбинировать эти два источника [39].

1.1 Наблюдения и обработка данных

Фотометрические наблюдения скопления Trumpler 24 проводились в обсерватории Лас-Кампанас (LCO) ночью 12 и 13 августа 2016 г. с помощью 1-метрового телескопа ². Для прямой ПЗС-съемки в полосах пропускания *UBVI* использовалась камера E2V CCD231-#84 (4096 × 4112 пикселей) с масштабом 0.435"/пиксель с полем зрения 29.7' × 29.8'. ПЗС работала без бининга при номинальном усилении 1.04 e⁻/ADU, что означает шум считывания 3.4e⁻ на квадрант.

В ходе двух циклов наблюдений, обозначенных N1 и N2, мы покрыли область в направлении Trumpler 24 с помощью пяти площадок, обозначенных Tr24_1, Tr24_2 и т. д. на Рис. 1.2 и в Таблице 1 соответственно. Как видно на Рис.1.2, между разными кадрами достаточно перекрытий (от 3' до 5'). Наблюдения проводились при приемлемых условиях видимости (разрешение всегда меньше

²<http://www.lco.cl/telescopes-information/herrietta-swope>

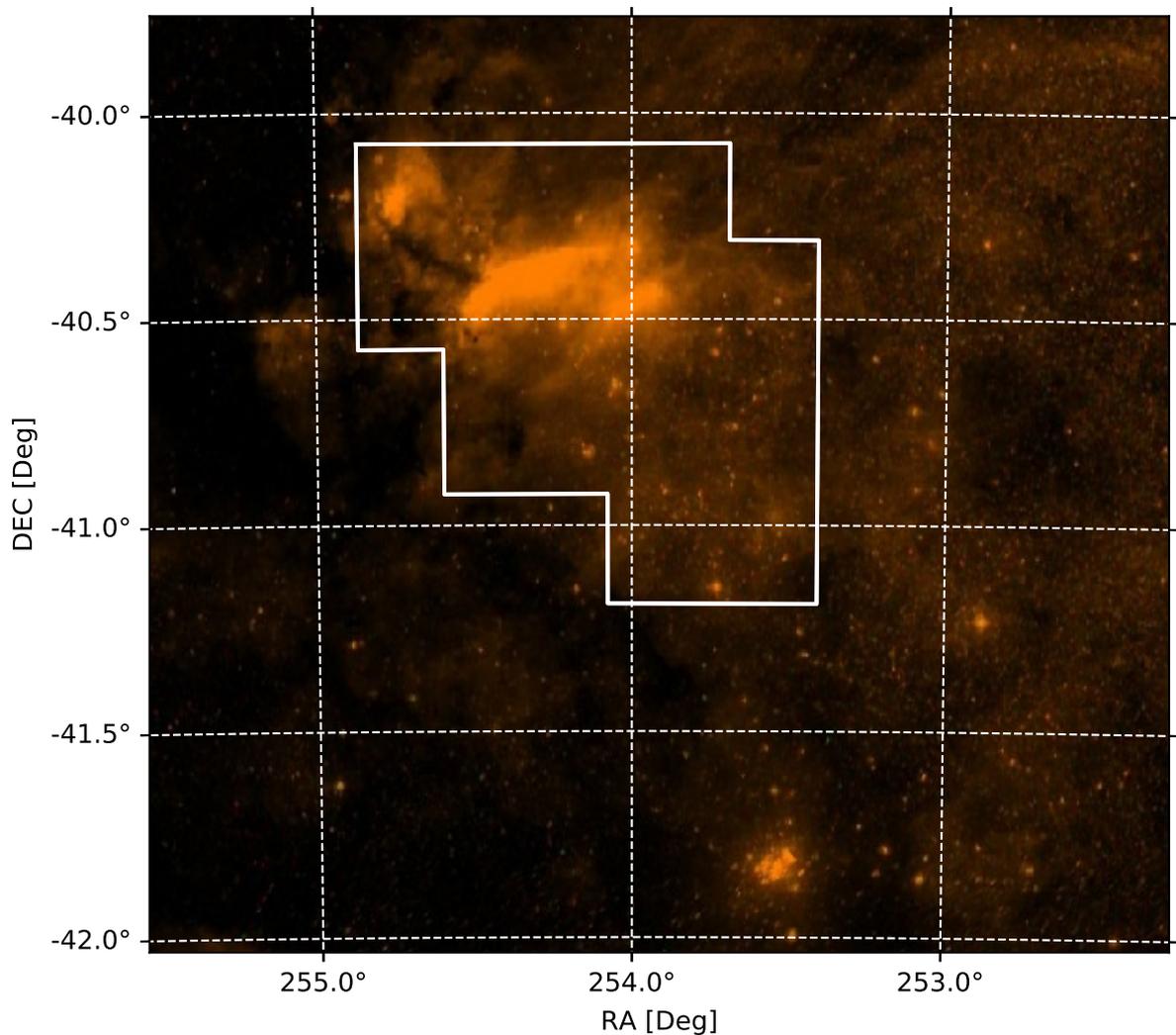


Рисунок 1.1 — Окрестности **Sco OB1**, данные Digital Sky Survey. Белый многоугольник очерчивает поле покрытия нашей фотометрией (см. также Рис.1.2). Заметно рассеянное звездное скопление NGC 6231 на юго-западе, а в северной части большую часть занимает область HII G345.45+1.50. По полю рассеяно несколько ярких звезд, вероятно, ранних типов.

1.5").

Переход от инструментальной системы к стандартной системе Джонсона-Крона-Кузинса, а также поправки за атмосферное поглощение определялись путем многократных наблюдений стандартных звезд в областях Ландольта

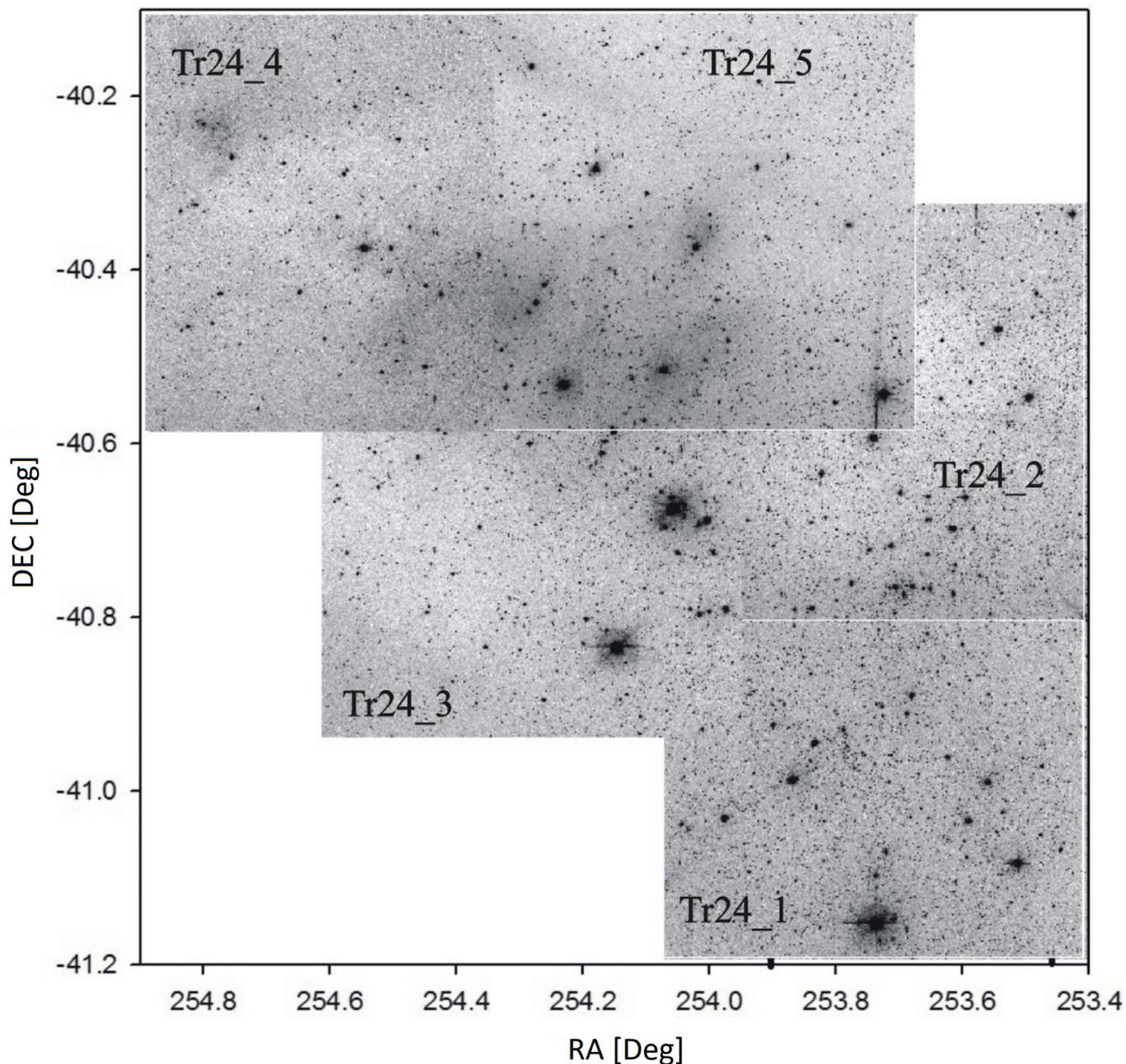


Рисунок 1.2 — Откалиброванные кадры ПЗС, пронумерованные в соответствии с Таблицей 1, для наглядной демонстрации качества изображения и фактического покрытия поля.

G93-48, PG2213-006 и TRHE [43]. С этой целью эти звезды наблюдались при воздушной массе от 1.06 до 2.12 в течение обеих ночей. Стандартные звезды охватывают цветовые диапазоны $-0.29 \leq B - V \leq 1.55$, $-1.22 \leq U - B \leq 1.87$, что хорошо подходит для фотометрии молодых звезд; предполагалось, что в составе Trumpler 24 большую часть составляют как раз молодые звезды.

Таблица 1 — Фотометрические наблюдения в фильтрах *UBVI* в пяти полях.

Поле	Дата	Фильтр	Экспозиция (с)	Воздушная масса
Tr24_1	N1	<i>U</i>	60,300	1.035 - 1.038
		<i>B</i>	30,200	1.042 - 1.043
		<i>V</i>	15,150	1.046 - 1.048
		<i>I</i>	15,100	1.029 - 1.030
Tr24_2	N2	<i>U</i>	60,300	1.020 - 1.021
		<i>B</i>	60,200	1.020 - 1.021
		<i>V</i>	15,100	1.020 - 1.020
		<i>I</i>	15,100	1.021 - 1.021
Tr24_3	N1	<i>U</i>	60,300	1.024 - 1.025
		<i>B</i>	30,200	1.021 - 1.021
		<i>V</i>	15,100	1.022 - 1.022
		<i>I</i>	15,100	1.026 - 1.026
Tr24_4	N2	<i>U</i>	60,300	1.024 - 1.024
		<i>B</i>	60,200	1.021 - 1.021
		<i>V</i>	15,100	1.022 - 1.022
		<i>I</i>	15,100	1.026 - 1.026
Tr24_5	N1	<i>U</i>	60,300	1.020 - 1.021
		<i>B</i>	30,200	1.019 - 1.019
		<i>V</i>	15,100	1.020 - 1.021
		<i>I</i>	15,100	1.022 - 1.023

Начальная калибровка научных ПЗС кадров была выполнена с использованием пакета CCDRED IRAF. Каждую ночь снимались кадры темнового тока и плоские поля. Перед корректировкой кадров с учетом плоского поля все кадры были скорректированы на линейность, следуя алгоритму, описанному в [44]. Затем была проведена фотометрия с использованием пакетов DAOPHOT/ALLSTAR и PHOTCAL IRAF. Инструментальные величины были получены с использованием функции рассеяния точки (PSF) [45]. Были определены поправки за апертуру путем проведения апертурной фотометрии достаточного количества (от 20 до 90) хорошо изолированных звезд. Большая часть поправок находится в интервале от 0.14 до 0.31 звездной величины, в зависимости от фильтра. Наконец, PSF фотометрия в каждом фильтре была

Таблица 2 — Фотометрические наблюдения стандартных звезд в фильтрах *UBVI*.

Поле	Дата	Фильтр	Экспозиция (с)	Воздушная масса
G93-48	N1	<i>U</i>	2×200	1.34 - 2.00
		<i>B</i>	3×60	1.18 - 2.14
		<i>V</i>	2×40	2.08 - 2.10
		<i>I</i>	3×30	1.18 - 1.91
	N2	<i>U</i>	3×200	1.17 - 2.01
		<i>B</i>	2×60,40	1.17 - 2.07
		<i>V</i>	3×40	1.17 - 2.12
		<i>I</i>	3×30	1.17 - 1.92
PG2213-006A	N1	<i>U</i>	3×200	1.14 - 1.86
		<i>B</i>	3×60	1.15 - 1.74
		<i>V</i>	3×40	1.14 - 1.77
		<i>I</i>	3×30	1.14 - 1.92
	N2	<i>U</i>	4×200	1.14 - 2.00
		<i>B</i>	4×60	1.14 - 1.88
		<i>V</i>	4×40	1.14 - 1.92
		<i>I</i>	4×30	1.14 - 2.06
TPHE	N1	<i>U</i>	60,100	1.07 - 1.08
		<i>B</i>	40,80	1.10 - 1.10
		<i>V</i>	30,60	1.09 - 1.09
		<i>I</i>	10,30	1.08 - 1.08
	N2	<i>U</i>	200	1.06 - 1.06
		<i>B</i>	20,60,80	1.06 - 1.07
		<i>V</i>	5,20,60	1.07 - 1.07
		<i>I</i>	5,10,30	1.06 - 1.06

Таблица 3 — Коэффициенты преобразования для перевода инструментальных величин в стандартную систему $UBVI$

<i>Night</i>	u_1	u_3	b_1	b_3
N1	3.89 ± 0.04	-0.29 ± 0.01	1.82 ± 0.01	-0.08 ± 0.01
N2	3.83 ± 0.02	-0.30 ± 0.01	1.80 ± 0.01	-0.08 ± 0.01
	v_1	v_3	i_1	i_3
N1	1.71 ± 0.01	0.08 ± 0.01	1.81 ± 0.01	-0.05 ± 0.01
N2	1.73 ± 0.01	0.08 ± 0.01	1.68 ± 0.02	-0.04 ± 0.01
	u_2	b_2	v_2	i_2
N1	0.37 ± 0.02	0.21 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.03 ± 0.01
N2	0.41 ± 0.02	0.22 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.03 ± 0.01

скорректирована с учетом найденных апертурных поправок.

Уравнения преобразования для перевода инструментальных величин в стандартную систему $UBVI$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 u &= U + u_1 + u_2 \times X + u_3 \times (U - B) \\
 b &= B + b_1 + b_2 \times X + b_3 \times (B - V) \\
 v &= V + v_1 + v_2 \times X + v_3 \times (B - V) \\
 i &= I + i_1 + i_2 \times X + i_3 \times (V - I)
 \end{aligned}$$

где u_2 , b_2 , v_2 и i_2 — коэффициенты поглощения для полос $UBVI$, X — воздушная масса для каждой экспозиции и u_1 , b_1 , v_1 , i_1 , u_3 , b_3 , v_3 и i_3 — подобранные коэффициенты. Как уже говорилось, коэффициенты поглощения рассчитывались для каждой ночи.

Мы сравнили полученную фотометрию с данными других авторов. Было найдено 60 общих с [38; 46] звезд, но семь из них были исключены из рассмотрения, так как, вероятно, являются переменными звездами. Оставшиеся объекты использовались для вычисления средней разницы и стандартных отклонений (наши измерения минус результаты [38; 46]):

$$\Delta V = 0.012 \pm 0.055,$$

$$\Delta(B - V) = -0.006 \pm 0.047, \text{ и}$$

$$\Delta(U - B) = 0.145 \pm 0.085.$$

Наконец, преобразование координат детектора в экваториальные координаты на эпоху J2000.0 было выполнено с использованием координат Gaia DR2 [14] для 98 самых ярких звезд поля зрения. Количество звезд, обнаруженных в фильтрах V и B, составляет 21196. Из них для 8719 звезд были получены звездные величины в фильтре U и для 20960 - в фильтре I. Предел полноты для каждого фильтра следующий:

$$U_{lim} = 18.7,$$

$$B_{lim} = 19.9,$$

$$V_{lim} = 18.2,$$

$$I_{lim} = 20.2.$$

Полученный каталог был кросс-коррелирован с данными Gaia DR2 [14] с радиусом отождествления $1.5''$ (для 93% объектов угловое расстояние между источниками оказалось меньше $0.4''$). Используя изохроны [47] и учитывая параллаксы мы оценили примерный предел массы - около $0.85-1.0 M_{\odot}$. Количество совпадений с Gaia DR2 составило 21172 объекта, но для последующего анализа были сохранены только объекты с ошибками параллаксов менее 20%, поэтому количество объектов в окончательном каталоге составило 11506 объектов.

1.2 Анализ данных, физические группы и их свойства

В этом разделе описана процедура идентификации звездных групп и алгоритм оценки членства в группах отдельных звезд. Затем исследуются свойства найденных групп.

1.2.1 Алгоритм кластеризации

Мы применили алгоритм кластеризации в 5-мерном пространстве, используя экваториальные координаты, компоненты собственного движения и параллаксы. Следует отметить, что в рамках методов кластеризации термин *кластер* относится не к физически связанному звездному скоплению, а к совокупности объектов, обладающих общими свойствами и группирующихся в N -мерном координатном пространстве. Мы будем называть результат алгоритма кластеризации *кластером* или *группой* и использовать термин *звездное скопление* для физических астрономических объектов.

Принятый здесь алгоритм кластеризации основан на методе DBSCAN (основанная на плотности пространственная кластеризация для приложений с шумами). Алгоритм реализован на языке Python и использует в качестве основы модуль кластеризации библиотеки машинного обучения SCIKIT-LEARN[48]. Одной из основных особенностей DBSCAN является то, что он рассматривает кластеры как набор основных точек по соседству друг с другом, набор неосновных точек по соседству с основными точками и шум. Итак, по сравнению с другими широко используемыми методами, такими как методы k-mean и affinity propagation, DBSCAN имеет важное преимущество, а именно то, что часть точек считается шумом, не входящим в кластеры. Эта особенность была одним из решающих моментов при выборе DBSCAN как наилучшего метода для наших целей.

DBSCAN требуется числовые значения двух параметров: (1) eps - максимальное расстояние между двумя точками, чтобы считать, что одна из них находится по соседству с другой, и (2) N - количество точек в окрестностях точки, чтобы назвать ее основной точкой. Выбор параметров осуществлялся следующим образом:

- (а) параметры eps и N тестировались в широких интервалах: (0.01-0.99) и (10-60) соответственно. Нижний предел для N выбран в соответствии с [49], где рекомендуется принимать значения N не менее чем в два раза превышающие размерность данных. Поскольку в настоящей работе кластеризация выполняется в 5-мерном пространстве, минимальное значение N равно 10.

(b) были выбраны те параметры, которые привели к максимальному количеству кластеров: $eps=0.17$, $N=10$.

Чтобы получить численные значения вероятности принадлежности каждой звезды выборки к той или иной группе, а также учесть погрешности входных данных, алгоритм кластеризации применялся 1000 раз. При каждом запуске алгоритма в качестве данных брались значения, случайно выбранные из нормального распределения со средним значением, равным исходным данным, и дисперсией, равной погрешности. Ошибки брались индивидуально, поэтому для каждой звезды параметры брались из отдельных распределений. Средние значения ошибок собственных движений составляют $e_{\mu_{\alpha^*}} = 0.25 \text{ мсд.год}^{-1}$, а средняя ошибка параллаксов $e_{plx} = 0.13 \text{ мсд}$. Затем вероятность членства определялась как количество событий, когда звезда была отмечена как член кластера, деленным на количество запусков (1000).

Перед запуском описанного алгоритма к данным был применен анализ основных компонент (РСА) для устранения возможных корреляций между величинами. РСА строит ортогональную систему координат таким образом, что все последующие главные компоненты имеют наибольшую дисперсию и ортогональны предыдущим: первая главная компонента имеет наибольшую дисперсию, вторая имеет наибольшую дисперсию из оставшихся и ортогональна первой, и так далее. Затем все главные компоненты были приведены к единичной дисперсии.

В результате алгоритма кластеризации мы получили семь групп со звездами, имеющими вероятность принадлежности больше 50 % (Рис. 1.3). Для представителей самых многочисленных групп В (которую мы разделили на подгруппы В1, В2 и В3) и А были оставлены звезды, имеющие вероятность больше 90% и 98% (значения выбирались в соответствии с пиками распределения вероятностей). Для всех этих групп мы оценили основные физические свойства: возраст, избыток цвета, расстояние и среднее собственное движение. Расстояния были получены двумя независимыми способами: с использованием только фотометрии и по параллаксам Gaia DR2.

1.2.2 Фотометрические расстояния

Мы использовали начальную главную последовательность из [51] для оценки избытка цвета и модуля расстояния путем наложения теоретической главной последовательности на данные на двуцветной диаграмме $((U - B), (B - V))$ и диаграмме «цвет-звездная величина» $(V, B - V)$ (Рис. А.1 и Рис. А.2 в Приложении).

В области ассоциации Sco OB1 газ и пыль распределены неравномерно ([33]), что приводит к дифференциальному поглощению. Для получения более точных результатов в направлении каждой группы были рассчитаны коэффициент наклона вектора покраснения на двуцветной диаграмме $(U - B, B - V)$ и коэффициент отношения полного поглощения к селективному $R_V = A_V/E(B - V)$. Применяя взвешенный метод наименьших квадратов к данным на двуцветной диаграмме $(B - V, V - I)$, где звезды распределены почти параллельно вектору покраснения, мы нашли коэффициент наклона, а затем пересчитали его, используя параметризацию для оптических/ближних ИК длин волн, как описано в [52], и получили значения R_V и $(U - B)/(B - V)$. Результирующие значения R_V в направлении каждой группы перечислены в Таблице 4. Затем по двуцветной диаграмме $(U - B, B - V)$ стандартным способом [53] был получен избыток цвета $E(B - V)$.

1.2.3 Астрометрические расстояния

В разных работах были представлены различные оценки систематического сдвига параллаксов Gaia DR2. В статье [54] утверждается, что смещение нулевой точки равно 0.03 мсд (миллисекунд дуги), но есть данные, что оно больше. В статье [55] дана оценка в 0.053 мсд с использованием звезды ветви красных гигантов из каталога APOKASC-2. В работе [56] получено значение 0.046 ± 13 мсд, используя яркие внегалактические цефеиды. Все они указывают на то, что параллаксы Gaia DR2 занижены. Здесь мы использовали значение смещения 0.045 ± 0.009 мсд [23], полученное нами при сравнении фотометри-

Таблица 4 — Основные физические параметры обнаруженных групп. R_V — отношение полного поглощения к селективному в направлении каждой группы.

Группа	$E(B - V)$	$\sigma_{E(B-V)}$	D	$\log \tau$	$\sigma_{\log \tau}$	R_V	σ_{R_V}	A_V
	mag	mag	пк					mag
A	0.55	0.1	1608_{-35}^{+36}	8.75	0.1	3.0	0.2	1.65
B1	0.36	0.1	1549_{-47}^{+181}	6.45	0.3	3.2	0.2	1.15
B2	0.39	0.3	1644_{-78}^{+82}	6.75	0.4	3.1	0.2	1.21
B3	0.38	0.2	1629_{-21}^{+44}	6.95	0.3	3.5	0.2	1.33
C	0.57	0.2	1578_{-11}^{+85}	6.85	0.2	2.8	0.25	1.60
D	0.58	0.2	1761_{-36}^{+139}	8.0	-	3.1	0.25	1.80
E	0.57	0.2	1249_{-58}^{+61}	8.15	-	3.2	0.25	1.82
F	0.47	0.1	1682_{-54}^{+137}	> 6.6	0.5	2.9	0.2	1.36
G	0.40	0.2	1524_{-54}^{+135}	6.7	0.3	2.5	0.2	1.0

ческих параллаксов молодых рассеянных звездных скоплений северного неба с параллаксами, полученными по данным Gaia.

Мы применили ядерную оценку плотности (kernel density estimation – KDE) к распределению параллаксов. В качестве ядра мы использовали гауссиану с оптимальной шириной полосы, найденной из алгоритма перекрестной проверки индивидуально для каждой группы. Этот алгоритм находит параметры модели по части данных, а затем определяет, насколько хорошо полученная модель соответствует остальным данным. Для учета индивидуальных ошибок параллаксов каждой точке были поставлены в соответствии веса, равные $1/e_{plx}^2$, где e_{plx} - ошибка параллакса каждой звезды. Хотя изначально для нашего анализа мы отбирали звезды с ошибками параллаксов менее 20%, погрешности у звезд, принадлежащих к полученным группам, оказались значительно меньше - средняя ошибка диапазонов параллаксов составляет от 6% для группы C до 11% для группы D.

Результат ядерной оценки плотности аппроксимировался распределением Гаусса, затем удалялись точки, отстоящие от среднего больше, чем на 2σ . Эта процедура повторялась до сходимости. Когда количества звезд в группе было недостаточно для статистики, принималось среднее значение. Для учета погрешности систематического сдвига мы сместили параллаксы на ± 0.009 мсд и

повторили аппроксимацию гауссианой описанным выше способом. Полученные таким образом смещенные значения использовались для оценки погрешности расстояния.

Сравнение фотометрических и астрометрических расстояний показано на Рис. 1.4. В целом наблюдается хорошее согласие между двумя разными оценками, за исключением случая группы E. Из-за общего согласия мы примем в дальнейшем астрометрическое расстояние и для группы E, так как на фотометрическую оценку расстояния могла повлиять низкая числовая статистика.

1.2.4 Возраст

Возраст групп A, B, C, F и G оценивался путем наложения теоретических изохрон PARSEC + COLIBRI [47] на данные на диаграмме «цвет-звездная величина» ($V, B - V$) (см. Приложение A.2). Изохроны были предварительно сдвинуты на значения избытка цвета $E(B - V)$ и модуля расстояния $(m - M)_V$, найденные в 1.2.2. Полученный возраст указан в Таблице 4.

Группа A: около 60% звезд относятся к звездам до главной последовательности, а 5 - к проэволюционировавшим звездам красного сгущения, находящимся на диаграмме около $(B - V) \approx 1^m.7$ и $V \approx 13^m$. Звезды главной последовательности (ГП) — это звезды слабее $V \approx 15^m.5$ и краснее $(B - V) \approx 0^m.9$.

Группа B1: группа из 29 молодых звезд, около 75% из них - звезды до главной последовательности, звезды ГП можно найти в цветовом диапазоне $0^m.15 \lesssim (B - V) \lesssim 0^m.3$ и со звездной величиной $11^m.5 \lesssim V \lesssim 12^m.8$.

Группа B2: около 70% из 32 звезд являются звездами до главной последовательности с некоторым разбросом по возрасту, звезды ГП имеют цвета $0^m.2 \lesssim (B - V) \lesssim 0^m.4$ и звездные величины $12^m \lesssim V \lesssim 14^m$.

Группа B3: как и в случае групп B1 и B2, число звезд ГП составляет около 30-25%, они имеют цвета $0^m.2 \lesssim (B - V) \lesssim 0^m.5$ и звездные величины $11^m.2 \lesssim V \lesssim 14^m.3$. Остальные 70-75 % из 27 звезд являются звездами до главной последовательности.

Группа C: предполагается, что 5 из 9 звезд являются звездами ГП в диапазоне $0^m.4 \lesssim (B - V) \lesssim 0^m.6$ и $12^m.5 \lesssim V \lesssim 14^m$, а 4 звезды являются звездами до главной последовательности.

Группа F: небольшая группа из 10 звезд, 3 из них на ГП ($0^m.3 \lesssim (B - V) \lesssim 0^m.45$, $11^m.7 \lesssim V \lesssim 13^m.4$). 7 объектов относятся к звездам до главной последовательности, их положение на диаграмме разрознено, что вносит неоднозначность в оценку возраста.

Группа G: группа насчитывает 41 объект, около 34% находятся на ГП в следующих диапазонах: $0^m.2 \lesssim (B - V) \lesssim 0^m.55$ и $11^m \lesssim V \lesssim 13^m.9$

В группах **D** и **E** нет достаточного количества ярких звезд, и подбор изохрон может привести к неточным результатам. В этих двух случаях мы оценили возраст самых ярких звезд, все еще находящихся на главной последовательности, и приняли их за возраст групп.

1.2.5 Среднее собственное движение

Среднее собственное движение оценивалось с помощью итерационного метода, при котором из расчета поэтапно отсекались звезды, чьи значения отличались от среднего на 3σ и более. Результаты расчетов показаны на нижней панели Рис. 1.5. Как можно заметить, все найденные кластеры разделяются на две отдельные группы. Мы также вычислили тангенциальные скорости, которые показаны на верхней панели того же рисунка; размер векторов соответствует величине собственного движения для каждой звезды. Сплошная черная линия дает представление о масштабе тангенциальных скоростей. Заметно, что звезды также делятся на две отдельные группы. Компоненты среднего собственного движения и тангенциальные скорости групп приведены в Таблице 5.

1.2.6 Свойства найденных групп

В Таблице 4 и Таблице 5 мы представили параметры групп, оцененные по фотометрии и по данным Gaia DR2 соответственно. Для большинства групп были сохранены только звезды с вероятностью более 50%, за исключением самых богатых групп A и B, где порог был повышен до 98% и 90% соответственно,

Таблица 5 — Физические параметры групп по данным Gaia DR2

Группа	α град	δ град	D пк	μ_{α^*} мсд год ⁻¹	$\sigma_{\mu_{\alpha^*}}$ мсд год ⁻¹	μ_{δ} мсд год ⁻¹	$\sigma_{\mu_{\delta}}$ мсд год ⁻¹	v_T км с ⁻¹	σ_{v_T} км с ⁻¹
A	253.781	-40.956	1631 ⁺²³ ₋₂₂	-1.86	0.01	-3.81	0.01	33.46	0.81
B1	254.042	-40.677	1540 ⁺²⁰ ₋₁₉	-0.22	0.03	-1.22	0.03	9.25	0.59
B2	254.141	-40.571	1610 ⁺²³ ₋₂₂	-0.07	0.04	-1.05	0.03	8.11	0.29
B3	254.199	-40.635	1569 ⁺²¹ ₋₂₁	0.04	0.04	-1.19	0.03	8.95	0.5
C	253.510	-41.128	1521 ⁺²⁰ ₋₂₀	-0.50	0.07	-1.72	0.05	13.08	0.55
D	253.571	-41.120	1729 ⁺²⁷ ₋₂₆	-1.80	0.04	-3.76	0.03	34.07	0.8
E	253.722	-41.103	1663 ⁺⁵⁰ ₋₄₈	-1.72	0.12	-3.75	0.05	32.54	1.06
F	253.606	-41.041	1592 ⁺²³ ₋₂₂	-0.41	0.08	-1.45	0.11	11.42	0.88
G	253.701	-40.765	1533 ⁺²⁰ ₋₁₉	-0.30	0.03	-1.31	0.02	9.82	0.49

в согласии с пиками распределения вероятностей. Таблица 4 также включает (последние два столбца) тангенциальную скорость v_T и ее погрешность.

Чтобы дополнительно исследовать найденные кластеры, мы провели поиск ранее обнаруженных групп и скоплений в этом районе с помощью SIMBAD и сравнили их положение с идентифицированными нами группами. Некоторые из них имеют похожие координаты. VdB-Hagen 202 находится очень близко к группе A, а три скопления C 1652-405, ESO 332-13 и Trumpler 24 покрывают область нашей группы B (B1, B2 и B3). ESO 332-8, с другой стороны, находится недалеко от нашей группы G. Два предполагаемых скопления из SIMBAD, ESO 332-11 и C1652-407, не имеют аналогов в нашем исследовании. Мы предполагаем, что, скорее всего, они являются ложными обнаружениями. Наконец, наши группы C, D, E и F отсутствуют в SIMBAD.

В Таблице 6 мы перечислили координаты объектов SIMBAD и некоторые их физические свойства (расстояние, возраст, собственное движение), взятые из [57].

Группа A. Группа A явно совпадает с VdB-Hagen 202. В [58] оно описано как бедное звездами, возможно погруженное (embedded) скопление. Данный кластер также соответствует группе, обозначенной в [59] как Trumpler 24I. Это самая богатая звездами группа, обнаруженная в этом районе. Она также имеет наибольшую тангенциальную скорость и наибольший возраст. Оценка возраста дает 500 миллионов лет, в то время как астрометрический и фотометрический анализ подтверждают гелиоцентрическое расстояние 1.65 кпк. Эта группа не была обнаружена в работе [33], возможно, потому, что в ней нет молодых

Таблица 6 — Координаты скоплений в данной области по SIMBAD и их свойства по [57].

Скопление	Ближайшая группа	α град	δ град	D пк	$\log(\tau)$	μ_{α^*} , мсд год ⁻¹	$\sigma_{\mu_{\alpha^*}}$, мсд год ⁻¹	μ_{δ} , мсд год ⁻¹	$\sigma_{\mu_{\delta}}$, мсд год ⁻¹
C 1652-405	B1	254.046	-40.667	2160	7.12	-1.72	0.18	-2.44	0.08
ESO 332-11		254.025	-40.780	1841	7.10	-5.28	0.60	0.86	0.53
ESO 332-13	B2	254.166	-40.575	2910	6.82	-2.73	0.05	-0.57	0.02
C 1652-407		253.875	-40.833	1000	-	-0.89	0.54	-4.33	0.61
Trumpler 24		254.250	-40.667	1138	6.92	-4.36	0.03	-0.17	0.04
ESO 332-8	G	253.680	-40.708	1200	8.17	-3.87	0.12	-0.52	0.16
VdB-Hagen 202	A	253.795	-40.940	1607	8.05	-2.55	0.21	-2.89	0.33

М-звезд. С другой стороны, недалеко от этого положения в [50] обнаружили две богатые группы (3 и 5 по их нумерации) молодых звезд чуть севернее нашей группы А. Большой возраст и тангенциальное движение наталкивает на мысль, что, возможно, эта группа не принадлежит ассоциации, но, вероятно, была захвачена при прохождении через нее. Группы D и E (см. ниже) обладают теми же свойствами, что и группа А.

Группа В. Эта группа расположена в южной части области III G345+1.50 и выглядит довольно разреженной. Сравнивая с данными DBSCAN, можно отметить, что B1, B2 и B3 примерно соответствуют Trumpler 24. [59] также идентифицировал эту группу, которую обозначил как группу Trumpler 24 III. Она отделена промежутком от других групп, найденных нами. Помимо местоположения, эти 3 группы имеют одинаковый возраст и кинематику. В литературе расстояние до Trumpler 24 колеблется от 1.6 до 2.2 кпк [38; 59]. Наше исследование склоняется к меньшему расстоянию, как по фотометрии, так и по параллаксам Gaia DR2. Похожие на данную группу образования были выявлены как в [50], так и в [33].

Группа С. Это очень бедная звездами группа, расположенная в юго-западном углу поля исследования. В основном она состоит из звезд раннего типа (ранний спектральный класс В, судя по двуцветной диаграмме), и имеет тот же возраст, что и Trumpler 24 (группа В). Кинематические параметры также похожи.

Группа D. Несмотря на свою близость к группе С, эта группа очень отличается. Она не содержит молодых звезд, и ее кинематика ближе к VdB-Hagen 202, чем к Trumpler 24. Кажется, что она также находится несколько на заднем

плане по отношению к Trumpler 24. Мы предполагаем, что эта группа является частью группы А. (см. Таблицу 5).

Группа Е. Если мы примем расстояние, определенное по астрометрии, эта малонаселенная группа будет иметь ту же кинематику, что и группа D, и находится очень близко к VdB-Hagen 202. Недостаток звезд не позволяет нам вычислить точный возраст. Однако представляется правдоподобным принять возраст, близкий к группе D. Мы предполагаем, что эта группа является частью группы А (см. Таблицу 5).

Группа F. Параметры этой группы похожи на параметры группы С. Она совпадает с группой 3 из [50]. Наличие нескольких звезд раннего типа, а также возраст, кинематика и расстояние соответствуют параметрам Trumpler 24.

Группа G. Это группа соответствует группе Trumpler 24 II из [59]. Подобно группам С и F, эта группа состоит из молодых звезд. Расположенная к северу от старой группы А (VdB-Hagen 202), она, однако, по среднему собственному движению напоминает Trumpler 24.

В целом, анализируя обнаруженные группы, можно прийти к выводу, что все они делятся на два семейства:

- *семейство I:* группы В, С, F и G; их двуцветные диаграммы типичны для очень молодого населения, в их состав входят звезды до главной последовательности, что видно по их диаграммам «цвет – звездная величина». Величины их средних собственных движений также близки: $\mu_{\alpha^*} = \mu_{\alpha} \cos \delta = -0.3 \text{ мсд год}^{-1}$, $\mu_{\delta} = -1.3 \text{ мсд год}^{-1}$.
- *семейство II:* группы А, D и (возможно) Е значительно старше, а их компоненты собственного движения имеют схожие значения: $\mu_{\alpha^*} = -1.7 \text{ мсд год}^{-1}$, $\mu_{\delta} = -3.7 \text{ мсд год}^{-1}$. Расстояния до этих групп в среднем больше, чем до групп *семейства I*.

1.3 Звезды до главной последовательности

В работе [60] предположено, что в ассоциации Sco OB1, которая богата звездами до главной последовательности, в недавнем прошлом могли происходить довольно бурные процессы. В работе [38] обнаружил большое количество кандидатов в звезды до главной последовательности в некоторых частях Sco

OB1 в диапазоне V от 11 до 14 звездных величин. Даминиани [33] выполнил обширный поиск таких звезд в рентгеновском, H_α и инфракрасном диапазонах.

Наше исследование с использованием более глубокой фотометрии подтверждает наличие молодых объектов. Действительно, анализ диаграмм «цвет-звездная величина» групп В, С, F и G (см. приложение А) указывают на явное присутствие звезд до главной последовательности. Для дальнейшего исследования этих звезд мы используем фотометрию в среднем инфракрасном диапазоне, взятую из литературы, кросс-коррелируя ее с нашим набором данных. Хорошо известно, что звезды до главной последовательности, не полностью потерявшие околозвездные диски, демонстрируют избыток излучения в ИК-диапазоне ($\lambda \geq 2\mu$). Чтобы исследовать наличие этого эффекта в наших данных, мы следовали процедуре, описанной в [61]. Следуя [61], звезды до главной последовательности делятся на три класса: объекты класса III относятся к звездам до главной последовательности без дисков (а также к фоновым звездам, которых у нас не должно быть в нашей выборке), а классы II и I — это молодые звездные объекты со сжимающимися оболочками и, следовательно, оптически толстыми дисками. Они отличаются разным количеством избытка в инфракрасной области спектра. Объекты класса I обладают самым высоким избытком инфракрасного излучения, а объекты класса II имеют промежуточное значение.

Разделение выполняется с помощью двуцветных диаграмм ([4.6] — [12], [3.4] — [4.6]), где [3.4], [4.6], [12] — фильтры WISE [62] W1, W2, W3 соответственно. Существуют также молодые объекты, которые не имеют избыточного излучения на этих длинах волн, а только за пределами 20 мкм, и их можно обнаружить с помощью двуцветной диаграммы ([4.6] — [22], [3.4] — [4.6]), где [22] — фильтр W4 WISE. Предполагается, что эти объекты представляют собой так называемые *переходные диски* (transition disks, TD), которые могут быть результатом формирования планет, фотоиспарения или других процессов, приведших к исчезновению внутреннего диска.

Для звезд групп В, С, F и G мы осуществили кросс-корреляцию с данными из WISE, приняв радиус кросс-корреляции $2''$. Результаты проиллюстрированы на Рис. 1.7 и могут быть обобщены следующим образом:

- подгруппа В1:** было найдено 11 TD;
- подгруппа В2 :** 13 TD, 3 объекта класса II;
- подгруппа В3 :** 15 TD;
- группа С:** 3 TD;

группа F : только 1 TD;

группа G: 11 TD .

Затем, используя те же критерии из [61], мы исследовали звезды до главной последовательности, которые не связаны с нашими группами *семейства I*, но имеют ту же кинематику и расстояние. Мы нашли 154 звезды (обозначены черным на рис. 1.6), 136 из которых TD, и 22 объекта класса II. Их пространственное распределение показано на рис. 1.7.

Таким образом, мы находили звезды PMS повсюду в исследуемой области, вплоть до $V = 18^m$. Как показано на рис. 10 и 11 в работе [33], наибольшая концентрация молодых объектов M-типа совпадает с областью, занимаемой нашими группами B, C, F, G и D (хотя группа G немного смещена к северо-западу).

Пространственное распределение звезд *семейства I* (как OB, так и звезд до главной последовательности) показано на Рис. 1.7. Нижняя панель, в частности, показывает увеличение звездной плотности с юго-запада на северо-восток и промежуток в приблизительном местоположении (немного северо-восточнее) группы A (VdB-Hagen 202).

На Рис. 1.8 представлена диаграмма «цвет-звездная величина» всех звезд, отнесенных к группам *семейства I*. На данные наложены теоретические звездные изохроны из набора Падуанских моделей [47] для различных возрастов. Указаны также несколько значений соответствующих звездных масс. Можно заметить, что звезды до главной последовательности в этой области Sco OB1 имеют диапазон масс от 0.5 до 3 M_{\odot} .

1.4 Выводы

В этом исследовании мы представили новую высококачественную оптическую фотометрию для северо-восточного региона ассоциации Sco OB1. В сочетании с собственными движениями и параллаксами из Gaia DR2 этот набор данных позволил нам охарактеризовать регион с точки зрения звездного населения: возраста, расстояния, покраснения и кинематики. Анализ этого материала привел нас к выделению нескольких групп с различными фундаментальными свойствами, которые мы разделяем на два семейства:

- *семейство I*: группы В (В1, В2 и В3), С, F и G. Их диаграммы «цвет-звездная величина» типичны для очень молодого населения: OB-звезды главной последовательности и звезды до главной последовательности разных классов. Они имеют схожие компоненты собственного движения: $\mu_{\alpha^*} = -0.3 \text{ мсд год}^{-1}$, $\mu_{\delta} = -1.3 \text{ мсд год}^{-1}$. Они также имеют схожие расстояния.

В целом группа В совпадает с Trumpler 24, а группы С, F и G обозначаются в [33] как Trumpler 24-S. Мы также характеризуем популяцию звезд до главной последовательности как в этих группах, так и в целом в данной области. Такие звезды с одинаковой кинематикой занимают всю обследованную нами область, хотя их плотность, по-видимому, увеличивается к северу, возрастая от Trumpler 24-S к Trumpler 24.

- *семейство II*: группы А, D и E значительно старше и имеют похожие значения компонентов собственного движения: $\mu_{\alpha^*} = -0.3 \text{ мсд год}^{-1}$, $\mu_{\delta} = -1.3 \text{ мсд год}^{-1}$. У них в среднем расстояния больше, чем у *семейства I*. Мы подтверждаем, что группа А (VdB-Hagen 202), считавшаяся ранее ненадежно определенным скоплением, является физическим объектом. Похоже, что это рассеянное скопление промежуточного возраста, что нетипично и неожиданно для этой области; оно находится внутри ассоциации (и движется сквозь нее). Учитывая разную тангенциальную скорость (как направление, так и величину), скопление, возможно, захвачено при пересечении ассоциации. Группы D и E со схожими свойствами, скорее всего, являются частями одного и того же скопления. Они могут быть следствием приливного распада VdB-Hagen 202. Еще одно доказательство этого связано с обнаружением промежутка в распределении звезд *семейства I*, как показано на рис. 1.7. На этом рисунке падение плотности в распределении звезд *семейства I* обнаружено примерно в направлении VdB-Hagen 202. Заманчиво интерпретировать этот минимум плотности как результат прохождения VdB-Hagen 202 через ассоциацию.

Можно заключить, что *семейство I* — это звездное население, связанное с ассоциацией, центром которой является NGC 6231, а *семейство II* — это более старое население, не связанное с ассоциацией.

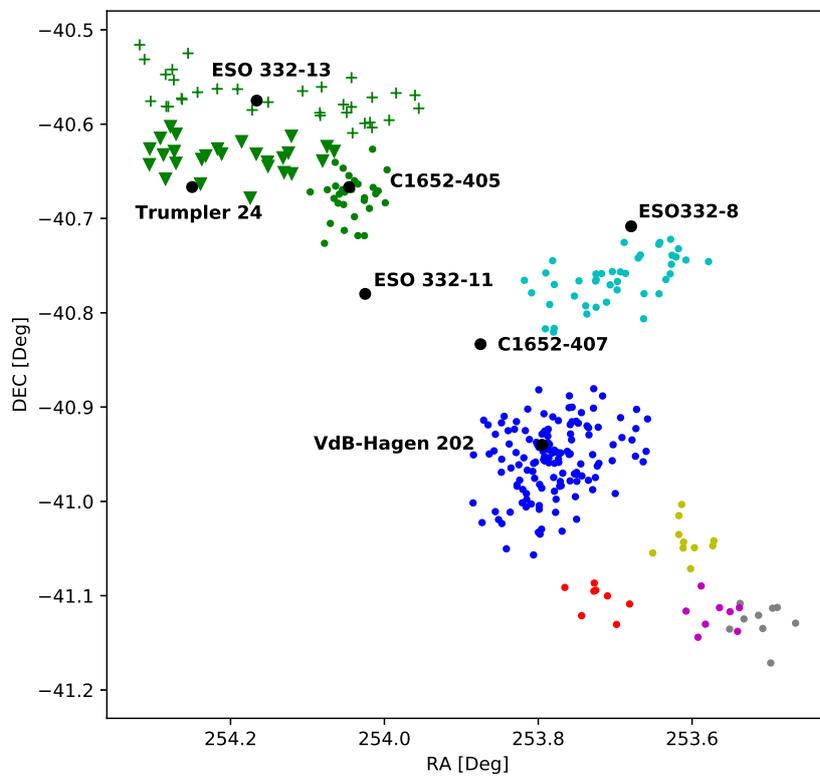
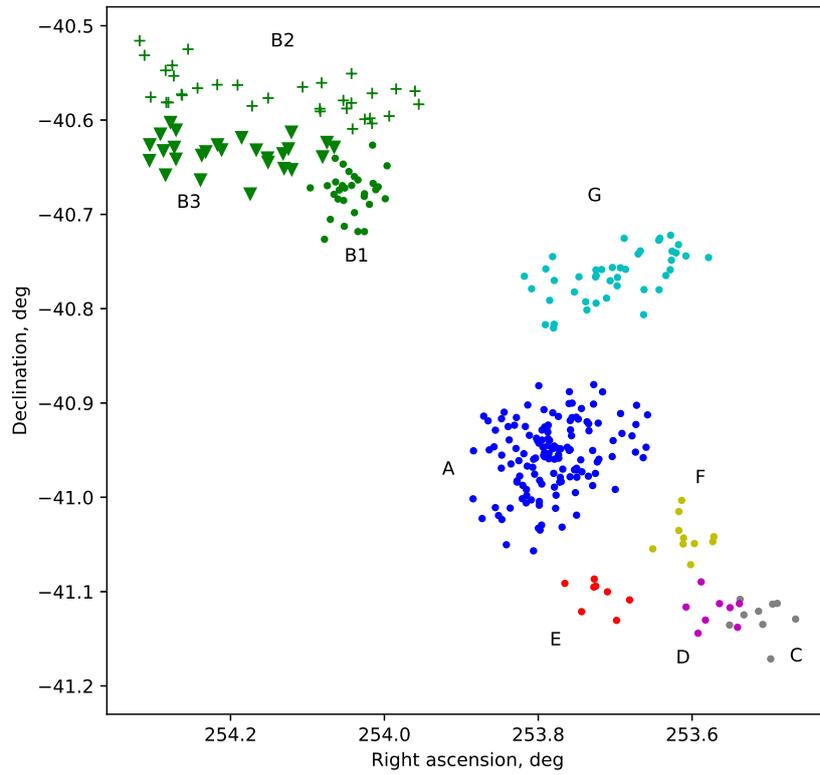


Рисунок 1.3 — Обнаруженные группы в окрестности поля звездной ассоциации **Sco OB1** и сравнение с известными или предполагаемыми скоплениями из Simbad.

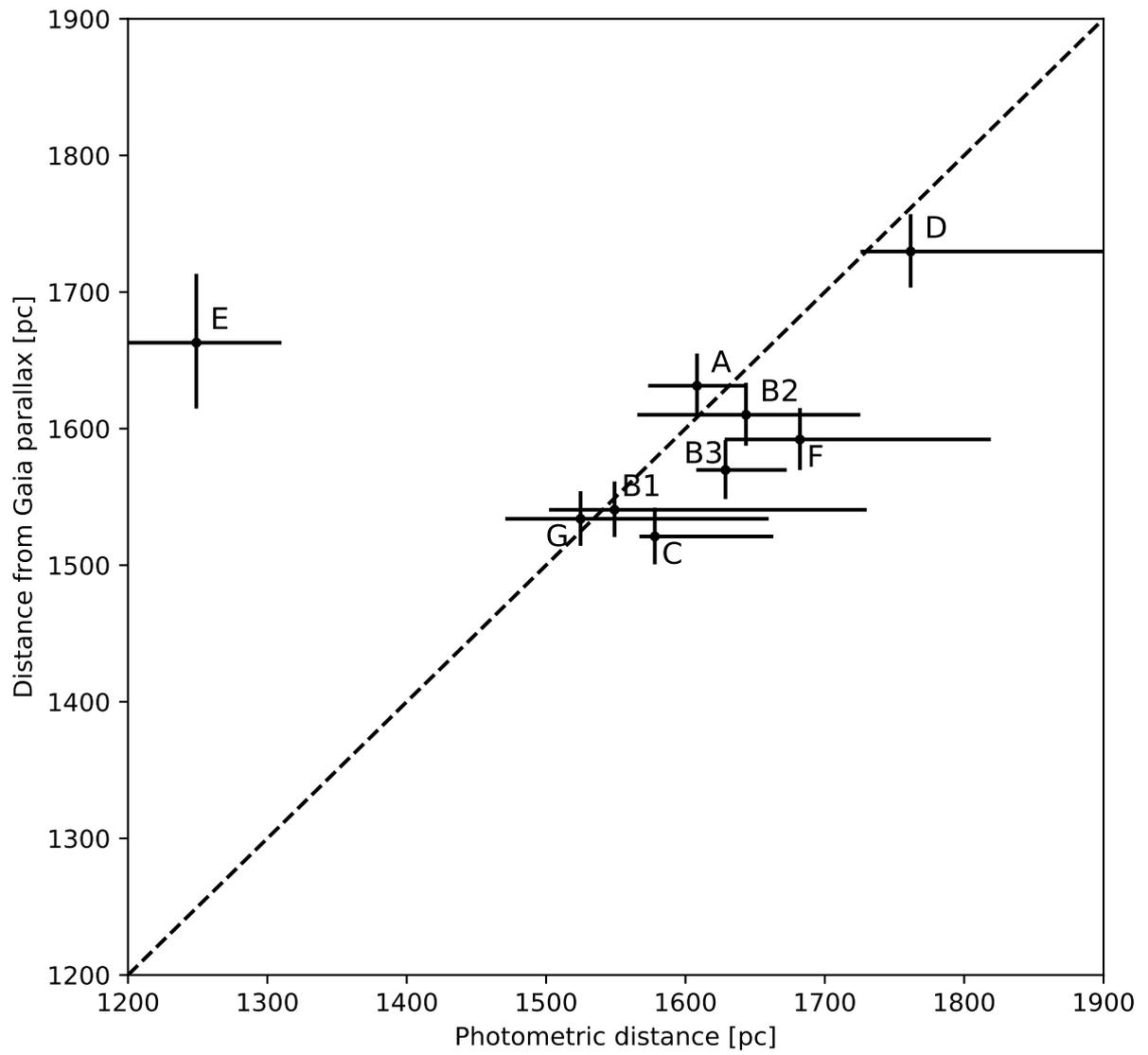


Рисунок 1.4 — Фотометрическое расстояние vs. расстояние по данным параллакса Gaia DR2

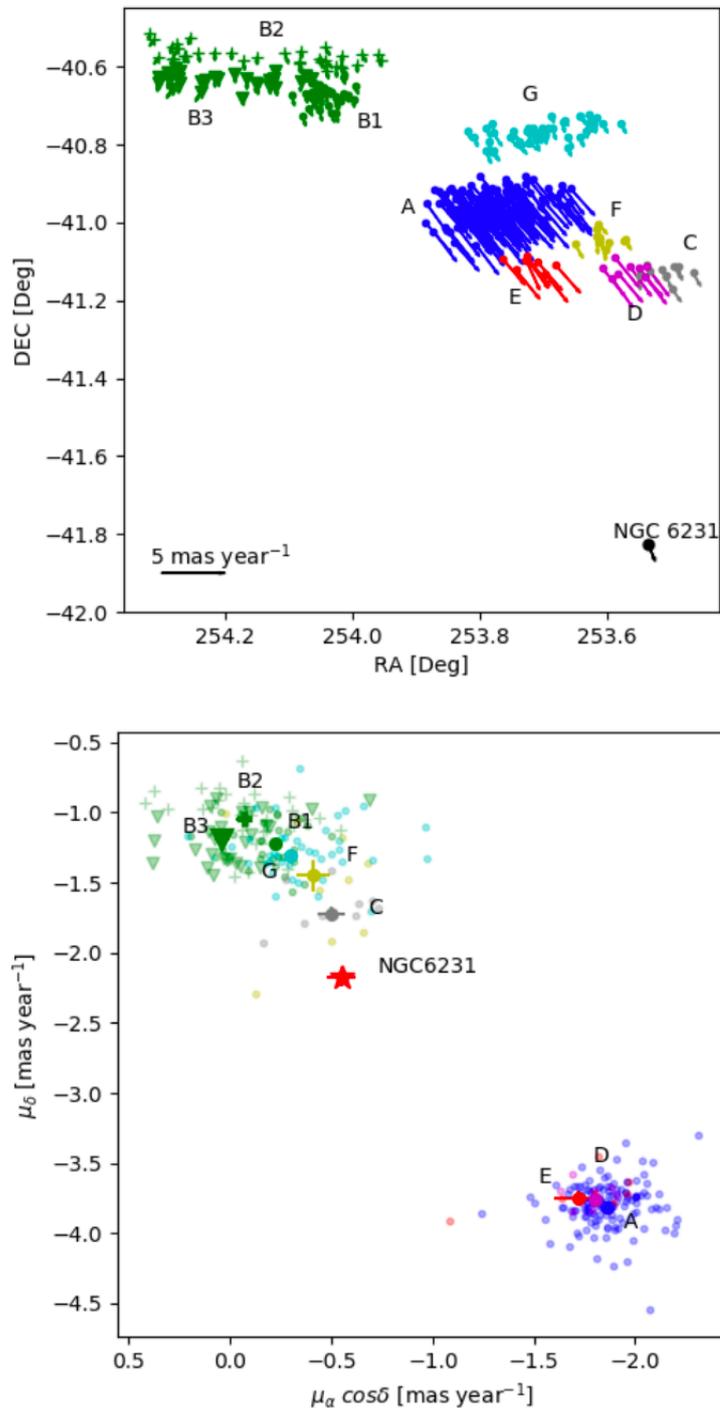


Рисунок 1.5 — Верхняя панель: тангенциальное движение различных групп. Размеры стрелок пропорциональны скоростям. Для сравнения также указано тангенциальное движение NGC 6231 [50]. Нижняя панель: диаграмма собственного движения. Цвета обозначают различные группы, как на Рис. 1.3.

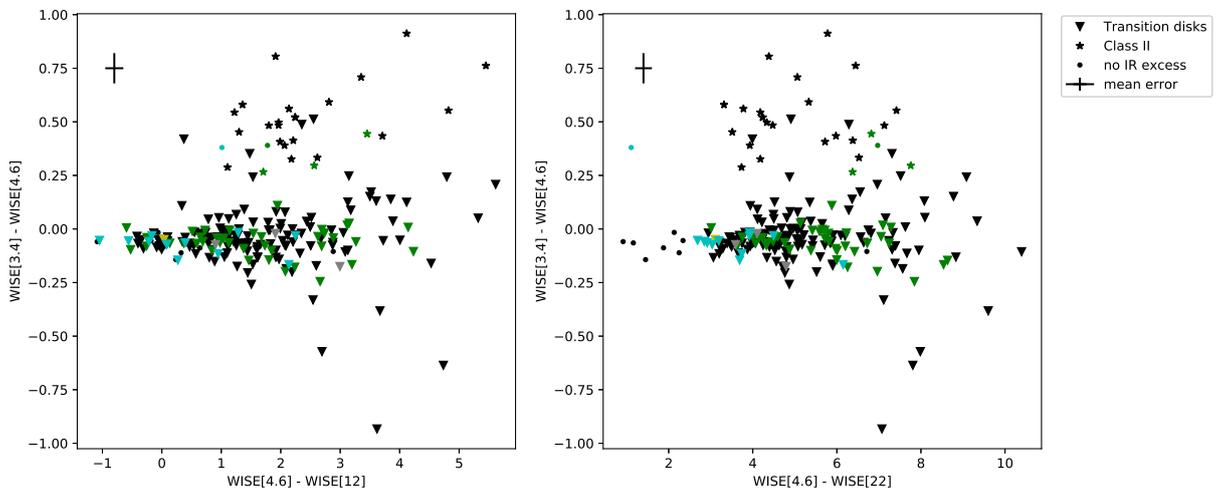


Рисунок 1.6 — Две двухцветные диаграммы по данным WISE, построенные для идентификации звезд до главной последовательности. Цвета соответствуют группам, как и на предыдущих рисунках, а черным цветом мы обозначили звезды, не связанные с группами.

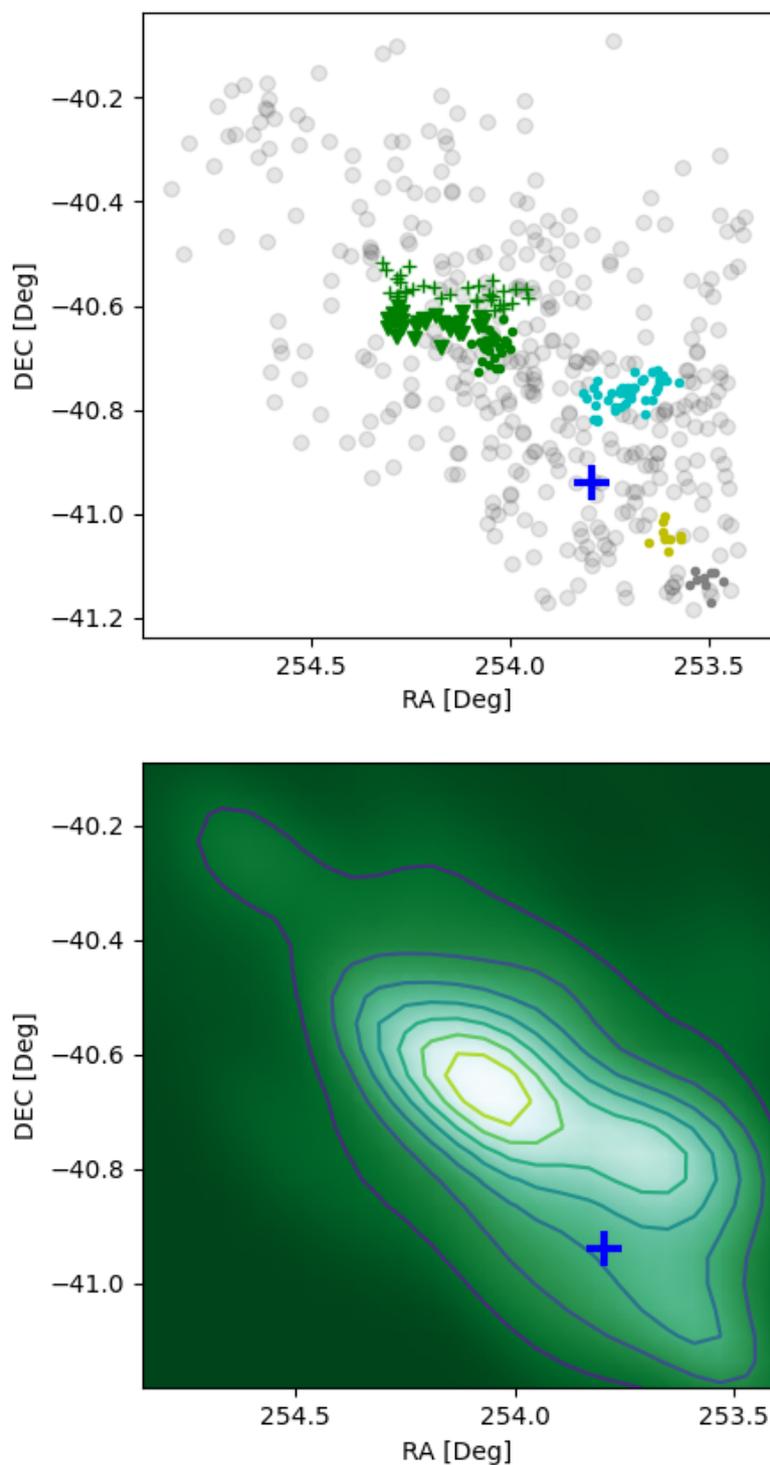


Рисунок 1.7 — Пространственное распределение (верхняя панель) и карта поверхностной плотности (нижняя панель) звезд, принадлежащих *семейству I*. Цвета соответствуют цвету групп на Рис.1.5. Серым цветом мы выделили звезды, не связанные с группами.

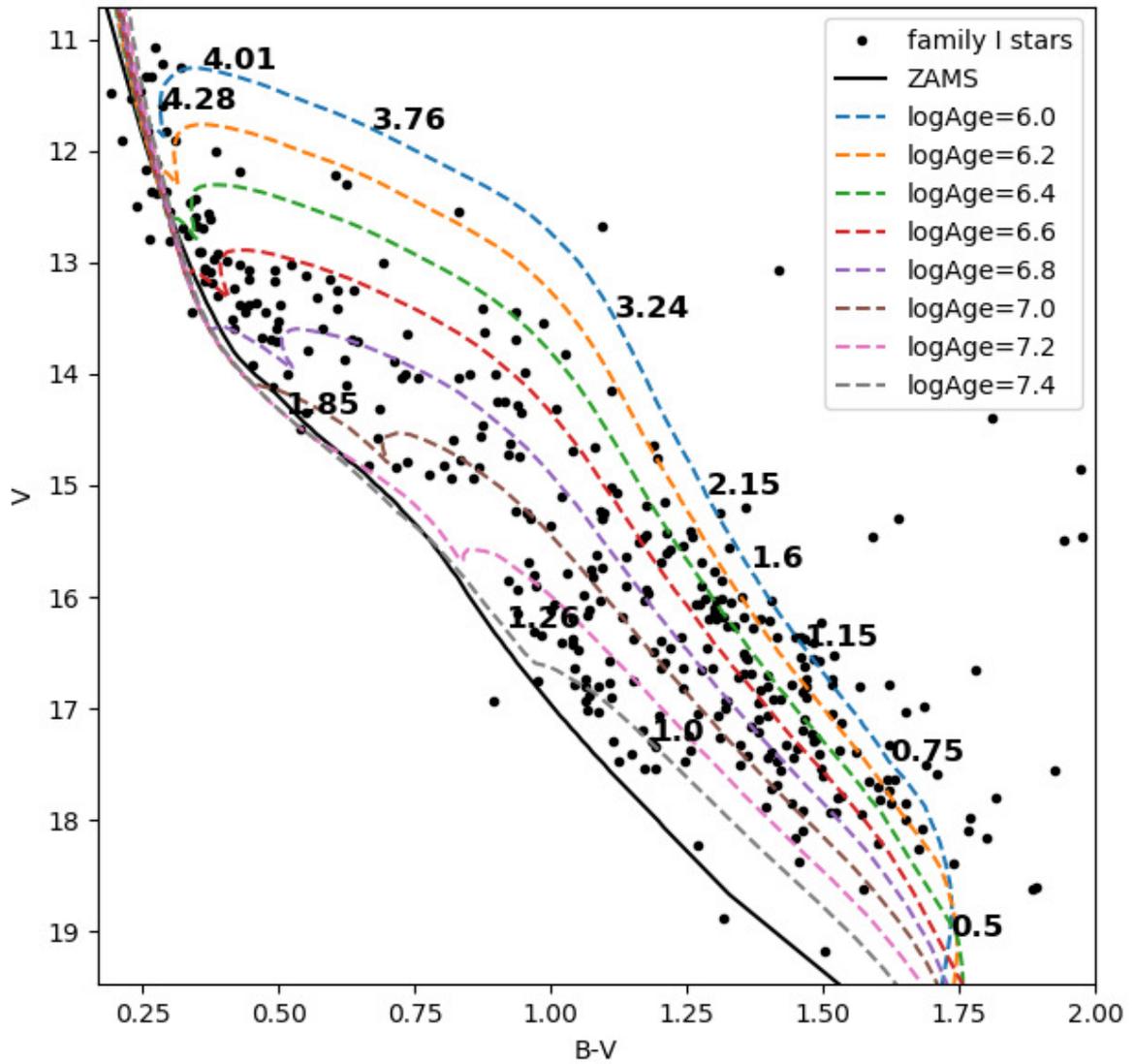


Рисунок 1.8 — Диаграмма цвет-звездная величина для всех обнаруженных нами звезд *семейства I*. Наложены теоретические изохроны [47]. Несколько значений звездных масс указаны для наглядности.

Глава 2. Исследование рассеянного звездного скопления NGC 225¹

Доля двойных звезд α в рассеянных звездных скоплениях, по-видимому, отличается среднего значения доли двойных в шаровых скоплениях и в поле Галактики [63], при этом α в поле Галактики, по-видимому, связано со значением доли двойных звезд в рассеянных скоплениях, как показано в серии работ [64–66]. α является важным параметром, влияющим на динамическую эволюцию родительского скопления, и может быть ответственным за целый ряд эффектов, от динамического нагрева и сегрегации масс до создания экзотических систем.

Значение доли двойных звезд в рассеянном скоплении зависит от различных факторов. Маркс и др. [67] показали, что более плотные скопления изначально имеют меньшую долю двойных звезд по сравнению с менее плотными системами того же возраста. В этом же исследовании было показано, что в более плотных скоплениях больше двойных систем распадаются за один и тот же промежуток времени из-за более высокой частоты столкновений. Кроме того, массивные двойные звезды могут быть выброшены из родительских скоплений; доля таких выброшенных двойных систем сильно зависит от начальной плотности скопления ([20; 21]).

Методы на основе фотометрии остаются наиболее популярным способом оценки доли двойных звезд. Основной подход таких исследований состоит в том, чтобы распознать двойные объекты в соответствии с их положением над главной последовательностью диаграммы «цвет–звездная величина» родительского скопления. Нью и др. [68] использовали метод синтетической диаграммы «цвет–звездная величина» для получения α для 12 рассеянных скоплений и получили значение в диапазоне от 29 до 55 % для звезд главной последовательности. Соллима и др. [69], используя тот же метод, сообщили об α равном от 35 до 70 % для 5 РЗС. Основываясь на положении звезд на диаграмме «цвет–звездная величина», Халай и Баумгардт [70] оценили долю двойных звезд в РЗС Ясли (M44) в 35 %, а Шейхи и др. [22] сообщили о доле в 34 ± 12 % двойных звезд в рассеянном скоплении Альфа Персея.

¹Данная Глава диссертации написана на основе работ №2 и №3 из списка публикаций автора по теме диссертации.

Другие оценки доли двойных звезд в скоплении базируются на более трудоемких методах, основанных на спектроскопии, где доля двойных систем оценивается путем изучения изменений лучевых скоростей. В работе Геллера и др. [71] были просуммированы результаты наблюдений старого РЗС М67 за более чем 45 лет и получена доля двойных звезд $\alpha = 34 \pm 3\%$ в среднем для скопления и $70 \pm 17\%$ для его центра. В работе Баньярда и др. [72] доля двойных среди звезд В-типа РЗС NGC 6231 была оценена в $52 \pm 8\%$.

Настоящее исследование относится к последней группе исследований. Мы стремились получить лучевые скорости для всех членов скопления до определенной звездной величины и исследовать на двойственность каждую из этих звезд. Рассеянное звездное скопление NGC 225 в Кассиопее является подходящим объектом для этой цели. Это скопление с умеренным количеством членов, расположенное в малонаселенной области неба ($l \approx 122^\circ.0$, $b \approx -1^\circ.06$). Исследования, проведенные разными авторами, показывают очень разрозненные оценки основных физических параметров NGC 225 ([73]), а в некоторых случаях даже противоречащие друг другу, см. Таблицу 7. Латтанзи и др. [74] исследовали NGC 225 и получили следующие оценки расстояния и возраста: $D = 525 \pm 73$ пк, $\tau = 120$ млн лет. Субраманьям и др. [75] утверждают, что скопление гораздо моложе, с $\tau < 10$ млн лет и расстоянием $D = 575 \pm 120$ пк. Напротив, Билир и др. [73] дали большую оценку возраста, $\tau = 900 \pm 100$ млн лет, при том же расстоянии $D = 585 \pm 20$ пк. Сволопулос [76] оценил расстояние в $D = 630$ пк. Оценка избытка цвета $E(B - V)$ варьируется от $0^m,151 \pm 0^m,047$ [73] до $0^m,25 \pm 0^m,08$ [74] и $0^m,29$ [75; 76]. Наиболее надежная оценка среднего собственного движения по прямому восхождению ($\langle \mu_{\alpha^*} \rangle$) и склонению ($\langle \mu_{\delta} \rangle$) была получена Кантат-Гаудином и др. [2] на основе Gaia DR2 [14]: $\langle \mu_{\alpha^*} \rangle = -5.373$ мсдгод $^{-1}$, $\langle \mu_{\delta} \rangle = -0.093$ мсдгод $^{-1}$; также было получено наиболее вероятное расстояние $D = 684.3$ пк.

Противоречивы и оценки средних лучевых скоростей. Билир и др. [73] нашли среднюю лучевую скорость скопления $\langle V_r \rangle = -8.3 \pm 5$ км с $^{-1}$ по восьми звездам в поле скопления. Конрад и др. [77] приводят другую оценку: $\langle V_r \rangle = 28$ км с $^{-1}$, в то время как Субиран и др. [16] использовали одну звезду для определения средней лучевой скорости и получили $\langle V_r \rangle = -4.12 \pm 11.13$ км с $^{-1}$.

Таким образом, мы определили следующие две главные цели нашего исследования: с одной стороны, скорректировать большое расхождение в значениях

Таблица 7 — Данные о физических параметрах рассеянного звездного скопления NGC 225 из литературы.

D, пк	τ , млн. лет	E(B-V), mag	$\langle V_r \rangle$, км с ⁻¹	Источник
525 ± 73	120	0.25 ± 0.08		Lattanzi et al. (1991)
575 ± 120	<10	0.29		Subramaniam et al. (2006)
585 ± 20	900 ± 100	0.151 ± 0.047	-8.3 ± 5 (8 звезд)	Bilir et al. (2016)
657			28	Conrad et al. (2017)
684.3			-4.12 ± 11.13 (1 звезда)	Soubiran et al. (2018)

физических параметров скопления, с другой стороны, определить долю двойных звезд и массу скопления.

2.1 Вероятность членства звезд в скоплении

Чтобы идентифицировать двойные звезды в скоплении до некой звездной величины, необходимо установить вероятность принадлежности звезд к скоплению. Этот шаг является самым первым этапом данного исследования, и он был выполнен, когда был доступен только второй релиз данных Gaia DR2 [14]. Поэтому мы загрузили данные с Gaia DR2 [14] в радиусе 25' с центром в точке $\alpha = 0^h 43^m 31^s$, $\delta = 61^\circ 47' 43''$. Учитывались только данные с ошибками параллакса менее 20%. Чтобы отличить вероятные члены скопления от звезд поля, мы провели кластерный анализ с использованием алгоритма DBSCAN, который является широко используемым методом [23; 78–81]. Как упоминалось в главе 1, для кластерного анализа с использованием DBSCAN необходимо зафиксировать два основных параметра: ϵ - максимальное расстояние между двумя точками, чтобы можно было сказать, что одна из них находится по соседству с другой, и N - количество точек в окрестности точки, чтобы определить ее как основную точку. Алгоритм реализован на языке Python с использованием библиотеки SCIKIT-LEARN [48]. Кластеризация проводилась в трехмерном пространстве с использованием параллаксов и двух составляющих собственного движения. Мы не использовали координаты, потому что NGC 225 довольно разреженное скопление. Прежде чем приступить к кластеризации, координаты

ты были приведены к единичной дисперсии, и был проведен анализ главных компонент, чтобы исключить возможные зависимости между координатами.

Поскольку найти наилучшее решение для значений ϵ и N обычно довольно сложно, мы решили применить статистический подход. В качестве первого шага мы проанализировали диаграмму собственных движений и распределение параллаксов звезд в поле скопления. Собственное движение звезд NGC 225 существенно отличается от среднего собственного движения звезд поля, что позволяет заметить концентрацию звезд на диаграмме собственных движений около значений, приведенных в [2]: $\mu_{\alpha*} \approx -5.4$ мсдгод⁻¹, $\mu_{\delta} \approx -0.1$ мсдгод⁻¹, где $\mu_{\alpha*} = \mu_{\alpha} \cos \delta$ и μ_{δ} - собственное движение по прямому восхождению и склонению соответственно. Звезды с собственным движением около этих значений имеют средний параллакс $\pi \approx 1.4$ мсд.

На втором этапе мы построили сетку параметров кластеризации ϵ и N в широком интервале ($\epsilon = 0.01 - 0.99$, $N = 1 - 150$), а затем проанализировали результат кластеризации. Среди всех решений кластеризации были выбраны те варианты, которые дали только два кластера (группы): группу со средними параметрами около значений, найденных на первом шаге (группа I), и группу звезд поля (группа II). Мы обнаружили, что $n = 1310$ кластеризаций удовлетворяет этим требованиям. Число звезд, идентифицированных как принадлежащие к группе I, оказалось равно 183.

На последнем третьем шаге мы оценили вероятность принадлежности звезды к NGC 225, разделив количество раз, когда звезда была отнесена к группе I, на количество найденных вариантов кластеризации n . Итоговое распределение вероятности принадлежности звезд к скоплению показано на Рис. 2.1. В соответствии с вероятностями были составлены два списка звезд: звезды с вероятностью принадлежности скоплению $p > 50$ процентов (список L₅₀) и звезды с вероятностью $p > 90$ процентов (список L₉₀) (Рис. 2.1). Из 183 звезд группы I 129 имеют вероятность ≥ 0.5 и из них 85 расположены выше порога 0.9. Список L₅₀ представлен в приложении (Таблица 25), где звезды отсортированы по звездной величине G_{Gaia} и пронумерованы от s001 для самых ярких звезд до s129 для самых слабых. В дальнейшем для расчетов мы используем данные звезд из списка L₅₀, применяя список L₉₀ для наиболее надежных оценок или как верхний/нижний пределы.

Мы сравнили результаты нашего исследования со списком звезд – членов скопления, идентифицированным Кантат-Гаудином и др. [2]. Список [2] включа-

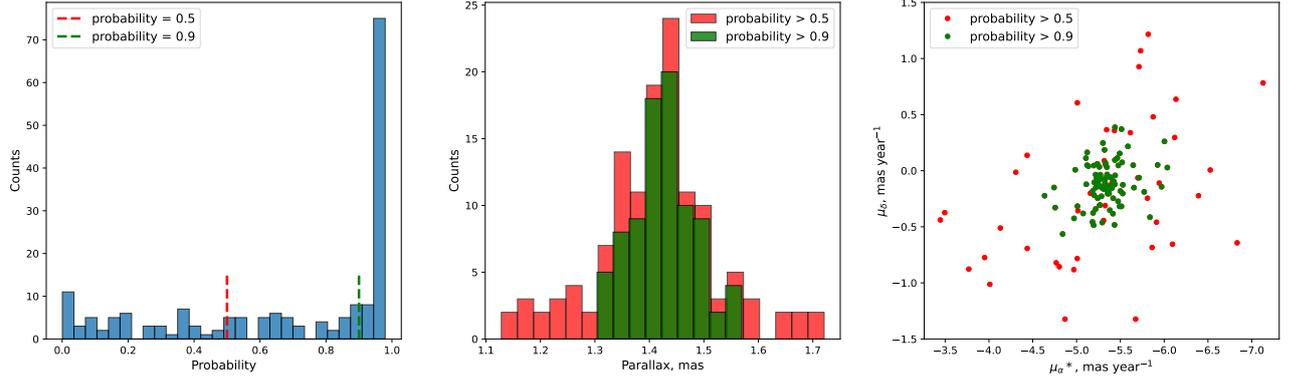


Рисунок 2.1 — Слева: распределение вероятности членства звезд в скоплении; показана вероятность всех звезд, когда-либо идентифицированных как члены скопления. Посередине: распределение параллакса для звезд с членством более 50 % (обозначено красным) и 90 % (обозначено зеленым). Справа: диаграмма собственного движения для звезд с вероятностью членства более 50 % (обозначено красным) и 90 % (обозначено зеленым).

ет 66 звезд, которые лежат в той же области в радиусе $\approx 25'$. Мы обнаружили, что все эти звезды присутствуют в нашем списке L_{50} , а 62 из них также присутствуют в списке L_{90} .

В результате, следуя описанному выше методу, мы смогли найти вероятность того, что звезда является членом скопления, избегая нахождения точных значений ϵ и N .

В Таблице 8 перечислены средние значения параллаксов и собственных движений звезд-членов скопления. Как можно заметить, средние значения этих двух групп L_{50} и L_{90} очень похожи. Может сложиться впечатление, что дисперсия параллаксов слишком велика (см. рис. 2.1, средняя панель). Максимальная разница между параллаксом звезды из L_{50} и средним параллаксом $\langle \pi \rangle$ составляет $\Delta_{\pi} = 0.3$ мсд, что соответствует $\Delta_{\pi} / \langle \pi \rangle^2 = 149$ пк, а грубая оценка дисперсии дает значение $\sigma_{\langle \pi \rangle} / \langle \pi \rangle^2 = 50$ пк. Изначально мы использовали данные с ошибками параллакса не более 20 %, что означает, опять же грубо, $0.2 \langle \pi \rangle / \langle \pi \rangle^2 = 141$ пк. Это в 3 раза больше расчетной дисперсии и примерно равно максимальной разнице между параллаксами звезд и $\langle \pi \rangle$. Таким образом, можно прийти к выводу, что результаты кластеризации и определения вероятности членства звезды в скоплении вполне разумны в рамках ограничений входных данных.

Таблица 8 — Средние параметры: средний параллакс и его дисперсия, средние компоненты собственного движения по прямому восхождению и склонению и соответствующие дисперсии.

Параметры / список звезд	L ₅₀	L ₉₀
$\langle \pi \rangle$, мсд	1.42 ± 0.01	1.43 ± 0.01
$\sigma_{\langle \pi \rangle}$, мсд год ⁻¹	0.10 ± 0.01	0.06 ± 0.01
$\langle \mu_{\alpha^*} \rangle$, мсд год ⁻¹	-5.33 ± 0.02	-5.34 ± 0.02
$\sigma_{\langle \mu_{\alpha^*} \rangle}$, мсд год ⁻¹	0.46 ± 0.01	0.25 ± 0.01
$\langle \mu_{\delta} \rangle$, мсд год ⁻¹	-0.13 ± 0.01	-0.11 ± 0.01
$\sigma_{\langle \mu_{\delta} \rangle}$, мсд год ⁻¹	0.37 ± 0.01	0.20 ± 0.02

Важно отметить, что для первых 30 ярчайших звезд из 183 (общего числа звезд, когда-либо относившихся к звездам группы I) вероятность принадлежности оказалась больше 50 %. Этот факт позволяет утверждать, что ни один из вероятных членов среди первых 30 ярчайших звезд не был пропущен, что соответствует $G_{Gaia} \leq 13.4^m$.

2.2 Отличие от данных Gaia EDR3

Поскольку идентификация вероятных членов скопления происходила до выхода Gaia EDR3 3 [15], мы основывали наши результаты на Gaia Data Release 2 [14]. Чтобы сравнить наши результаты с улучшенными данными Gaia EDR3, мы провели кросс-корреляцию звезд с вероятностью членства > 50 % с данными Gaia EDR3 и изучили различия между параллаксами и собственными движениями. Для большинства звезд из L₅₀ относительная разница между параллаксами Gaia DR2 и Gaia EDR3 составляла менее 10%, и только у одной звезды (s051) параллакс по данным Gaia EDR3 оказался намного меньше, чем приводимый в данных Gaia DR2 (для звезды s051 отличие между параллаксами по данным Gaia DR2 и Gaia EDR3 $(\pi_{DR2} - \pi_{EDR3})/\pi_{DR2} \approx 0.45$). Различия между каждой компонентой собственного движения для большинства звезд были в пределах 0.5 мсд год⁻¹, но для звезды s051 разница в компоненте μ_{δ} была в два раза больше - около 1 мсд год⁻¹. Поэтому мы решили удалить эту звезду

из нашей выборки. Это изменение затронуло только список L_{50} и уменьшило количество звезд до 128.

2.3 Наблюдения и обработка данных

2.3.1 Фотометрические наблюдения

Мы выполнили два сеанса фотометрических наблюдений в ночь с 17 на 18 августа и с 15 на 16 сентября 2020 г. на 60-см телескопе ГАИШ МГУ Кавказской горной обсерватории, оснащенный ПЗС-камерой Andor iKon-L (2048×2048 пикселей, размер пикселя 13.5 мкм, масштаб 0.67"/пиксель) и набор фотометрических фильтров (подробнее см. [82]). Мы получили фотометрию центральной части скопления в поле около $22' \times 22'$. Мы проводили наблюдения в фильтрах U, B, V, R_c, I_c в двух режимах: с короткими и длинными экспозициями для самых ярких и слабых звезд соответственно (Таблица 9). Все кадры были обработаны с учетом кадров с нулевой экспозицией и плоских полей, которые снимались каждую ночь.

Мы выполнили PSF-фотометрию ([83]) с использованием программного обеспечения IRAF DAOPHOT/ALLSTAR. Функция рассеяния точки рассчитывалась для каждого кадра отдельно по 10-20 изолированным ярким звездам, расположенным по всему кадру, после чего ко всем данным была применена поправка за апертуру. Поправка определялась из апертурной фотометрии, полученной для тех же звезд, которые использовались при моделировании PSF.

Мы преобразовали инструментальные звездные величины в стандартную систему Джонсона-Крона-Кузинса, используя данные из базы данных Stetson² для звезд рассеянного скопления NGC 7790, которое мы наблюдали в те же ночи (Таблица 10). Мы использовали следующие уравнения преобразования:

$$\begin{aligned} u &= U + u_1 + u_2(U - B), \\ b &= B + b_1 + b_2(B - V), \\ v &= V + v_1 + v_2(B - V), \\ r &= R_c + r_1 + r_2(R_c - I_c), \end{aligned}$$

²<https://www.canfar.net/storage/list/STETSON/Standards>

Таблица 9 — Фотометрические наблюдения NGC 225

Дата	Фильтр	Экспозиция, s	Воздушная масса
17 August 2020	U	3×100	1.05
		3×150	1.05
	B	3×10	1.05
		3×30	1.05
	V	3×3	1.05
		3×5	1.05
	R_c	3×1	1.05
		3×2	1.05
	I_c	3×2	1.05
		3×3	1.05
15 September 2020	U	5×50	1.10
		3×150	1.09-1.10
	B	5×10	1.10
		3×50	1.09
	V	5×1	1.10
		3×10	1.09
	R_c	5×1	1.10
		3×5	1.09
	I_c	5×1	1.10
		3×5	1.09

$$i = I_c + i_1 + i_2(V - I_c),$$

где u, b, v, r, i – инструментальные звездные величины, U, B, V, R_c, I_c – стандартные звездные величины, а $u_1, u_2, b_1, b_2, v_1, v_2, r_1, r_2, i_1$ и i_2 – параметры фитирования. Как видно из Таблицы 9 и Таблицы 10, оба скопления наблюдались при одной и той же воздушной массе, поэтому зависимость от воздушной массы мы исключаем из уравнений. Мы использовали Astrometry.net [84] для преобразования инструментальных координат в экваториальные координаты для равноденствия J2000.0.

В результате мы получили фотометрию в полосах U, B, V, I_c и R_c для 29, 36, 40, 39 и 54 звезд соответственно. Четыре ярчайшие звезды в фильтре

Таблица 10 — Фотометрические наблюдения NGC 7790

Дата	Фильтр	Экспозиция, s	Воздушная масса
17 August 2020	U	3×100	1.05
	B	3×60	1.05
	V	3×10	1.05
	R_c	3×5	1.05
	I_c	3×5	1.05
15 September 2020	U	3×150	1.08-1.09
	B	3×60	1.09
	V	3×10	1.08
	R_c	3×5	1.08
	I_c	3×10	1.08

полосы B оказались пересвечены, и мы рассчитали их звездную величину в полосе V по показателю цвета ($V - I_c$).

Мы сравнили наши фотометрические результаты с фотоэлектрической фотометрией UBV из [85] и нашли 11 общих звезд с величинами в фильтре V и 7 общих звезд показателями цвета $B - V$ и $U - B$. Сравнение показывает (здесь и далее наши данные минус опубликованные):

$$\Delta V = -0.060 \pm 0.013,$$

$$\Delta(B - V) = -0.056 \pm 0.011,$$

$$\Delta(U - B) = 0.294 \pm 0.012.$$

Как мы упоминали выше, звезды s1,s2,s3 и s4 были пересвечены в фильтре B , поэтому для них показатели цвета $U - B$ и $B - V$ взяты из [85]. Заметно, что $\Delta(U - B)$ намного больше, чем разница в V и $B - V$, и поэтому мы приняли решение сместить наши показатели цвета $U - B$ на эту величину, чтобы устранить разницу между нашими данными и $U - B$ из [85].

Мы сравнили наши данные с фотометрическим обзором всего неба AAVSO (APASS) [86] и обнаружили 25 общих звезд с фотометрией в полосах V и 21 общую звезду с показателями цвета $B - V$. Сравнение дало следующие результаты:

$$\Delta V = -0.050 \pm 0.006,$$

$$\Delta(B - V) = -0.014 \pm 0.015.$$

Мы использовали специальные уравнения³ для преобразования звездных величин Gaia DR2 G , B_P и R_P в фотометрическую систему Джонсона-Кузинса и, сравнив с нашей фотометрией, получили:

$$\Delta V = 0.030 \pm 0.008,$$

$$\Delta I = 0.030 \pm 0.009,$$

$$\Delta R = -0.019 \pm 0.009.$$

Полученные фотометрические данные для членов скопления доступны по следующей ссылке: http://www.sai.msu.ru/groups/cluster/cl/Ngc225_photometry/.

2.3.2 Спектроскопические данные

В данном исследовании использовались результаты двух серий наблюдений. Обе серии были выполнены в Астрофизической обсерватории Азиаго, (г. Азиаго, Италия).

Первая серия наблюдений была проведена в 1990-1991 гг. на 1.8-метровом телескопе «Коперник», оснащённом спектрографом Boller & Chivens + CCD. В качестве ПЗС использовалась Thompson TH7882, диапазон регистрации для дифракционных решеток 600 и 1200 лн/мм составлял $\lambda = 3790-4910 \text{ \AA}$ и $3850-4400 \text{ \AA}$ соответственно.

Вторая серия была проведена в 2019-2020 гг. Наблюдения проводились на 122см телескопе «Галилео», оснащённом спектрографом Boller & Chivens + CCD с решеткой 1200 лн/мм и диапазоном $\lambda = 3820-5035 \text{ \AA}$. Кроме того, на 182-сантиметровом телескопе «Коперник» было получено несколько Эшелле спектров ($\lambda = 3470 - 7360 \text{ \AA}$).

Обработка ПЗС кадров была выполнена с использованием пакетов IRAF и IRAF. В обеих сериях наблюдений регулярно снимались плоские поля для каждого сеанса наблюдений, а калибровочные спектры (Fe/Ar лампа) записывались перед наблюдением каждого спектра.

По наблюдениям, выполненным в 1990-1991 гг., лучевые скорости были получены для всех звезд методом кросс-корреляции с использованием проце-

³<https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/>

дур, реализованных в пакете программ ESO-IPAP и подробно описанных в [87]. Отличительной особенностью алгоритма является то, что в результате итеративного процесса определяется средний спектр для каждого цикла наблюдений, который по существу состоит из нормализованных спектров всех одиночных (не являющимися двойными) звезд – членов скопления. Типичная ошибка одиночного наблюдения ≈ 3 км сек $^{-1}$.

Для нахождения лучевых скоростей по спектрам, полученным в ходе наблюдений 2019-2020 гг., мы использовали метод кросс-корреляции Фурье, реализованный в среде IRAF. В качестве спектров сравнения использовались синтетические спектры из [88] с параметрами атмосфер, соответствующими спектральному классу из [89]. Спектральная классификация были выполнена в соответствии с [90]. В соответствии с полученными спектральными классами были выбраны синтетические спектры сравнения для каждой звезды.

2.4 Доля двойных звезд и средняя лучевая скорость

Результаты определения лучевых скоростей приведены в Таблице 11, а спектральная классификация представлена в Таблице 12.

Для поиска двойных звезд мы использовали следующие критерии:

(а) Если для звезды имеется более трех наблюдений, мы использовали критерий χ^2 с 95-процентным уровнем значимости. Этот критерий был применен к 11 звездам.

(б) Если для звезды имелось только 3 или 2 наблюдения, то рассчитывались средняя лучевая скорость (V_r) и дисперсия (σ), а затем сравнивались со средней лучевой скоростью скопления (V_{Cl}) и его дисперсией (σ_{Cl}). Если V_r отличалась от V_{Cl} на $3 \times \sigma_{Cl}$ или $\sigma > 3 \times \sigma_{Cl}$, звезда считалась двойной.

Средняя лучевая скорость скопления и ее дисперсия оценивались с помощью итерационного процесса, для расчета использовались только звезды, считающиеся одиночными. На первом этапе использовались только звезды, отмеченные как одиночные по критерию (а). Затем добавлялись звезды, отмеченные как одиночные по критерию (б), и снова вычислялись значения V_{Cl} и σ_{Cl} . Итерации повторялись до сходимости. Полученные значения средней лу-

Таблица 11 — Лучевые скорости 29 ярчайших звезд NGC 225. Символ «*» рядом с датой наблюдения относится к Эшелле наблюдениям.

№	дата, дд.мм.гггг	V_r , км с ⁻¹	№	дата, дд.мм.гггг	V_r , км с ⁻¹	№	дата, дд.мм.гггг	V_r , км с ⁻¹	№	дата, дд.мм.гггг	V_r , км с ⁻¹	
s001	09.01.90	-10	s004	09.01.90	-5	s008	04.12.19	-9.8	s014	23.01.20	-11.8	
	17.01.90	-12		17.01.90	-10		22.01.20	-10.3		20.11.20	-10.2	
	18.02.90	-5		18.02.90	-8		23.01.20	-9.0	s015	19.02.90	22	
	19.02.90	-12		19.02.90	-15		20.11.20	-7.9		28.09.90	-3	
	28.09.90	-2		28.09.90	-9		07.02.20*	-11.1		02.10.90	-15	
	02.10.90	-11		14.10.90	0		s009	09.01.90	-9	14.10.90	-8	
	14.10.90	-8		08.01.91	-9			18.02.90	-11	06.11.90	25	
	06.11.90	-6		24.01.91	-8			19.02.90	-11	08.01.91	4	
	08.01.91	-9		25.01.91	-9			28.09.90	-10	26.01.91	-10	
	24.01.91	-12		26.01.91	-9			02.10.90	-7	04.12.19	-9.6	
	25.01.91	-6		04.12.19	-10.9			14.10.90	-5	22.01.20	-9.7	
	26.01.91	-12		22.01.20	-9.3			06.11.90	-2	20.11.20	-9.6	
	04.12.19	-9.7		19.11.20	-9.2			08.01.91	-5	s016	12.01.20	-15.8
	11.01.20	-10.4		s005	09.01.90			-5	24.01.91		-3	20.11.20
	11.01.20	-12.8			18.02.90			10	26.01.91	-11	s017	04.12.19
19.11.20	-10.3	19.02.90	-10		04.12.19	-9.2	23.01.20	-13.5				
s002	09.01.90	-9	28.09.90		-19	22.01.20	-9.9	21.11.20	-12.9			
	17.01.90	-8	02.10.90		4	20.11.20	-8.4	s018	12.01.20	-10.1		
	18.02.90	-11	14.10.90		-16	s010	04.12.19		-9.4	21.11.20	-11.8	
	19.02.90	-8	06.11.90		-28		22.01.20	-11.3	s019	04.12.19	-10.9	
	28.09.90	-1	08.01.91		-27	23.01.20	-11.7	23.01.20		-11.9		
	02.10.90	-7	24.01.91		-28	20.11.20	-9.3	21.11.20	-10.4			
	14.10.90	-5	26.01.91		-10	07.02.20*	-11.4	s020	04.12.19	-10.8		
	06.11.90	-12	04.12.19	-8.3	s011	28.09.90	-1		21.11.20	-10.3		
	08.01.91	-13	22.01.20	-11.6		02.10.90	-8	s021	23.01.20	-23.1		
	24.01.91	-15	20.11.20	-8.2		14.10.90	-10		21.11.20	-14.5		
	25.01.91	-13	s006	19.02.90	-6	06.11.90	1	s022	11.01.20	-9.9		
	26.01.91	-8		28.09.90	-10	08.01.91	-20		21.11.20	-10.6		
	04.12.19	-8.2		02.10.90	-7	26.01.91	-1	s023	11.01.20	-15.8		
	22.01.20	-7.6		14.10.90	-8	04.12.19	-7.1		23.01.20	-15.6		
	19.11.20	-8.7		06.11.90	-12	23.01.20	-12.0	21.11.20	-12.7			
s003	09.01.90	-5	08.01.91	-6	20.11.20	-12.7	s024	04.12.19	-9.8			
	17.01.90	-3	24.01.91	-12	s012	04.12.19		-9.9	21.11.20	-10.4		
	18.02.90	-31	04.12.19	-9.8		23.01.20	-11.0	s025	12.01.20	-17.1		
	28.09.90	-16	11.01.20	-9.4		20.11.20	-10.3		21.11.20	-13.5		
	02.10.90	-3	22.01.20	-9.5	07.02.20*	-8.3	s026	11.01.20	-15.5			
	14.10.90	8	20.11.20	-8.6	s013	09.01.90		-15	21.11.20	-22.3		
	06.11.90	-14	s007	09.01.90		-9	28.09.90	-9	s027	11.01.20	-19.5	
	08.01.91	-32		28.09.90		1	02.10.90	13		22.11.20	1.2	
	24.01.91	-6		02.10.90		-3	14.10.90	10	s028	12.01.20	-6.3	
	25.01.91	-2		14.10.90		-9	06.11.90	26		22.11.20	-5.6	
	26.01.91	20		06.11.90		-12	08.01.91	30	22.11.20	-5.1		
	04.12.19	-4.8		08.01.91		-6	24.01.91	-12	s029	12.01.20	-2.9	
	22.01.20	-2.0		24.01.91		1	26.01.91	32		22.11.20	-42.6	
	19.11.20	-8.8		26.01.91		-6	04.12.19	-11.4		22.11.20	-41.9	
						04.12.19	-9.2	20.11.20	-11.7			

Таблица 12 — Спектральная классификация

N	Spectral type	Spectral type [74]
s001	B7	B6.5
s002	B8	B8
s003	B8	B9
s004	B9	A0
s005	B8III	B9
s006	B9	A0
s007	A1	A1
s008	A1	-
s009	A0	A0
s010	A3	A9
s011	A1	A0
s012	A2	-
s013	A1	A3
s014	A2	-
s015	A0III	A2
s016	A3	A5
s017	A5	-
s018	F2	A7
s019	F0	-
s020	F0	A7
s021	A3	
s022	F0	F0
s023	F2	-
s024	F6	F6
s025	F7	
s026	F5	F4
s027	F5	F3
s028	F5	F7
s029	F8	-

чевой скорости и дисперсии скопления составляют: $V_{Cl} = -9.8 \pm 0.7 \text{ км с}^{-1}$, $\sigma_{Cl} = 1.0 \pm 0.1 \text{ км с}^{-1}$.

Пользуясь критериями (а) и (б) были найдены 15 двойных звезд среди 29 звезд, принадлежащих списку L_{50} , или 12 звезд среди 22 звезд, принадлежащих списку L_{90} , что соответствует доле двойных звезд $\alpha = 0.52$ и $\alpha = 0.55$ соответственно (см. Таблицу 13).

2.5 Модуль расстояния и возраст

Для изучения влияния полученного значения доли двойных звезд на оценки массы скопления мы использовали теоретические изохроны, чтобы сопоставить звездной величине каждой звезды соответствующую массу. С этой целью мы, прежде всего, рассчитали модуль расстояния, наложив теоретические изохроны на положение звезд-членов скопления на диаграмме «цвет-звездная величина» и двуцветной диаграмме.

Мы следовали процедуре, описанной в [23] и в разделе 1.2.2. Во-первых, мы рассчитали отношение полного поглощения к селективному, $R_V = A_V/E(B-V)$, в направлении скопления, а также наклоны вектора покраснения $(U-B)/(B-V)$, используя уравнения [52] для оптического и ближнего ИК-диапазонов. Для этого мы нашли наклон вектора покраснения $(V-I)/(B-V)$ с помощью взвешенного метода наименьших квадратов по двуцветной диаграмме $(B-V, V-I)$, на которой звезды распределены практически вдоль параллельной линии (Рис. 2.2). По результатам расчетов $R_V = 3.03 \pm 0.02$ и $(U-B)/(B-V) = 0.767 \pm 0.001$. Очень близкое значение $R_V = 3.04$ для этого скопления было ранее получено Тернером [91].

Мы наложили теоретическую начальную главную последовательность (ZAMS) из [92] на диаграмму $(U-B, B-V)$, и оценили избыток цвета $E(B-V) = 0^m,29 \pm 0^m,01$ (Рис. 2.3). Затем мы использовали этот избыток цвета для определения видимого модуля расстояния путем совмещения ZAMS и наших данных на диаграмме $(V, B-V)$ Рис. 2.4. Мы использовали эти результаты, чтобы вывести модуль расстояния скопления $(m-M)_0 = 9^m,12 \pm 0^m,06$ и расстояние $D = 667 \pm 18$ пк. Наложив теоретические изохроны PARSEC + COLIBRI [93], мы получили оценку возраста $\log \tau = 8.0 - 8.2$.

Таблица 13 — Количество полученных спектров, средняя лучевая скорость и ее дисперсия, статус двойственности и вероятность принадлежности 29 ярчайших звезд к скоплению NGC 225.

№	количество спектров	$\langle V_r \rangle$, км с ⁻¹	σ_{V_r} , км с ⁻¹	двойственность	вероятность членства
s001	16	-9.3	3.1	одионочная	0.976
s002	15	-9.0	3.5	одионочная	0.775
s003	14	-7.1	13.5	двойная	0.958
s004	13	-8.6	3.4	одионочная	0.692
s005	13	-12.1	11.6	двойная	0.862
s006	11	-8.9	2.1	одионочная	0.977
s007	11	-6.3	4.3	двойная	0.970
s008	5	-9.6	1.2	одионочная	0.978
s009	13	-7.8	3.1	одионочная	0.977
s010	5	-10.6	1.2	одионочная	0.979
s011	9	-7.9	6.8	двойная	0.979
s012	4	-9.9	1.2	одионочная	0.976
s013	10	5.2	19.2	двойная	0.852
s014	2	-11.0	1.1	одионочная	0.682
s015	10	-1.4	14.1	двойная	0.977
s016	2	-14.2	2.3	двойная	0.955
s017	3	-13.4	0.5	двойная	0.970
s018	2	-10.9	1.2	одионочная	0.845
s019	3	-11.1	0.8	одионочная	0.978
s020	2	-10.6	0.3	одионочная	0.979
s021	2	-18.8	6.1	двойная	0.638
s022	2	-10.3	0.5	одионочная	0.977
s023	3	-14.7	1.7	двойная	0.977
s024	2	-10.1	0.4	одионочная	0.975
s025	2	-15.3	2.6	двойная	0.959
s026	2	-18.9	4.8	двойная	0.977
s027	2	-9.1	14.6	двойная	0.977
s028	3	-5.7	0.6	двойная	0.979
s029	3	-29.1	22.7	двойная	0.977

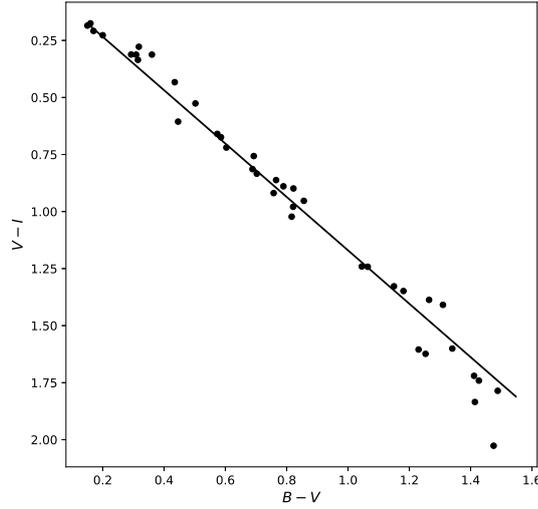


Рисунок 2.2 — Двухцветная диаграмма $(B - V, V - I)$ скопления NGC 225.

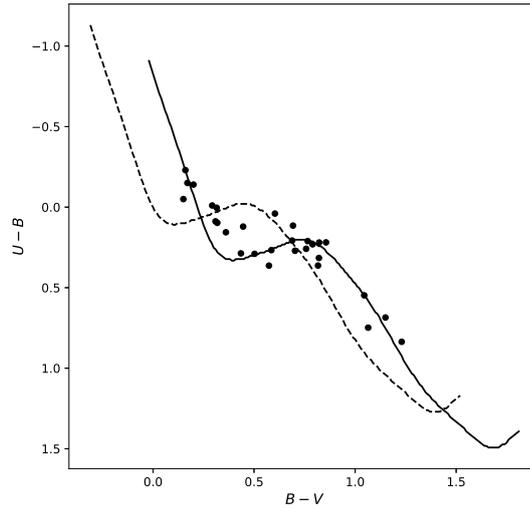


Рисунок 2.3 — Двухцветная диаграмма $(U - B, B - V)$ скопления NGC 225. Пунктирной линией проведена начальная главная последовательность, а сплошной линией - она же, но сдвинутая на величины избытков цвета.

Чтобы независимо проверить результаты и исключить наличие ошибки, связанной с возможным систематическим сдвигом нашей фотометрии, мы вычислили эти же параметры с помощью фотометрии Gaia. Накладывая теоретические изохроны PARSEC + COLIBRI [93] на фотометрию Gaia EDR3 (см. рис. 2.5), мы нашли следующие параметры:

$$(m - M)_G = 9^m,90 \pm 0^m,06$$

$$E(G_{BP} - G_{RP}) = 0^m,40 \pm 0^m,02,$$

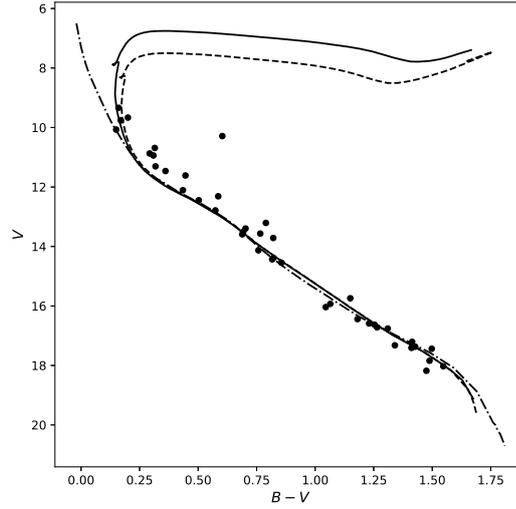


Рисунок 2.4 — Диаграмма «цвет–звездная величина» ($V, B - V$) скопления NGC 225. Сплошной и пунктирной линиями показаны изохроны с $\log Age = 8.0$ and $\log Age = 8.2$. Штрихпунктирной линией проведена начальная главная последовательность.

$\log \tau = 8.0 - 8.2$ или 100-160 миллионов лет,

где G_{BP} and G_{RP} - голубая и красная полосы Gaia, см. Рис.. 2.5. Используя коэффициенты [52], мы получили $E(B-V) = 0^m,29 \pm 0^m,01$, $(m-M)_0 = 9^m,15 \pm 0^m,07$ и расстояние $D = 676 \pm 22$ пк. Можно заметить, что наблюдается замечательное согласие результатов. Для определенности в дальнейшем для оценки массы мы будем использовать $(m-M)_G = 9^m,90 \pm 0^m,06$.

Мы сравнили полученное фотометрическое расстояние с данными [94], основанными на данных Gaia EDR3. Взяв медианное значение r_{geo} - медианы геометрического расстояния, $b_{r_{geo}}$ - 16-го перцентиля геометрического расстояния и $B_{r_{geo}}$ - 84-го перцентиля геометрического расстояния (использованы принятые в [94] обозначения), получаем 682 пк, 664 пк и 707 пк соответственно. Расстояние, указанное Кантат-Гаудином и др. [2], составляет $D = 684.3$ пк. Таким образом, значения хорошо согласуются с нашей оценкой.

С другой стороны, наша оценка возраста хорошо согласуется с оценкой [74], а именно около 120 млн лет.

Мы получили то же значение избытка цвета $E(B-V)$, что и в [76] и [75].

Мы сравнили это значение с данными трехмерной карты покраснения от пыли [95]. Мы извлекли данные в направлении каждой звезды из списка L_{50} для расстояния $D = 676$ пк и, предполагая $R_v = 3.1$ и используя для преобразова-

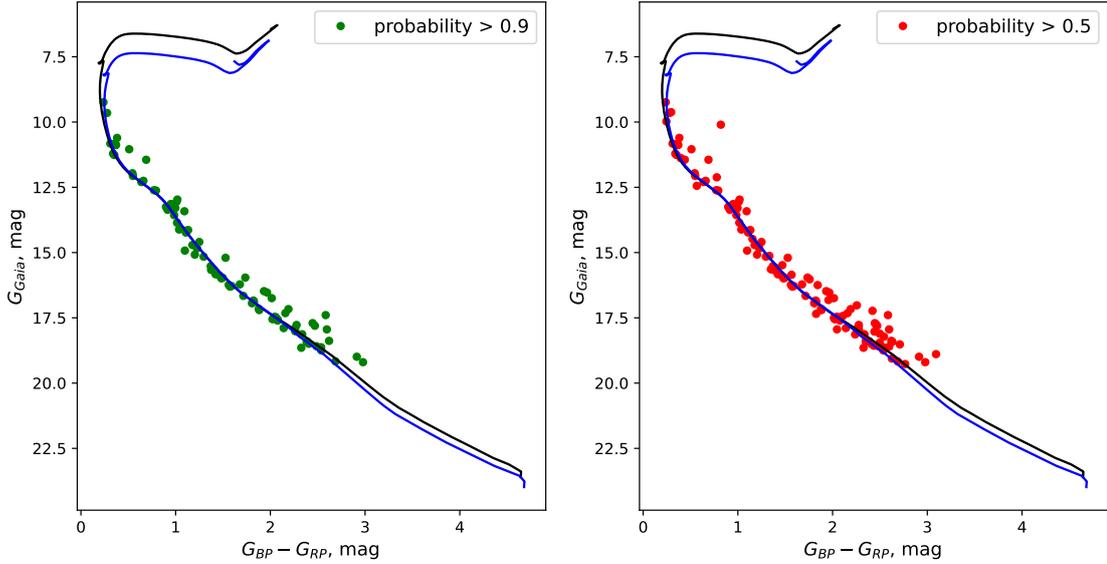


Рисунок 2.5 — Диаграмма «цвет-звездная величина» ($G_{Gaia}, G_{BP} - G_{RP}$) скопления NGC 225. Черная и синяя линии - изохроны с $\log \tau = 8.0$ и 8.2 соответственно. На левой панели представлены звезды с вероятностью принадлежности более 90 процентов, на правой панели - с вероятностью принадлежности более 50 процентов.

ния коэффициенты из [96], получили средний избыток цвета $E(B - V) = 0.29$. Также трехмерная карта среды STILISM [97] для того же расстояния $D = 676$ пк дает средний избыток цвета $E(B - V) = 0.31$, что хорошо согласуется с полученным нами значением.

2.6 Масса скопления

Перед расчетом массы скопления следует оценить фотометрическую полноту нашей выборки.

В [98] утверждается, что Gaia DR2 полна вплоть до $G = 18^m.9 - 21^m.3$ в зависимости от небесных координат. Кажется разумным предположить, что предел Gaia EDR3 не хуже этого значения. На рис. 2.6 показано нормированное распределение звездной величины Gaia EDR3 G для звезд из нашего списка L_{50} (вероятность принадлежности $> 50\%$). Красная линия — это результат оценки ядерной плотности, примененной к этим данным. В качестве ядра использо-

валась функция Гаусса с шириной полосы = 0.3. Мы выбрали это значение при тех же предположениях, что и в [99]. Правее $G_{Gaia} \approx 18^m,5$ наблюдается резкий спад, который мы интерпретировали как предел фотометрической полноты. На рис. 2.6 этот предел показан штрихпунктирной линией. Количество звезд с $G_{Gaia} \leq 18^m,5$, равно 110.

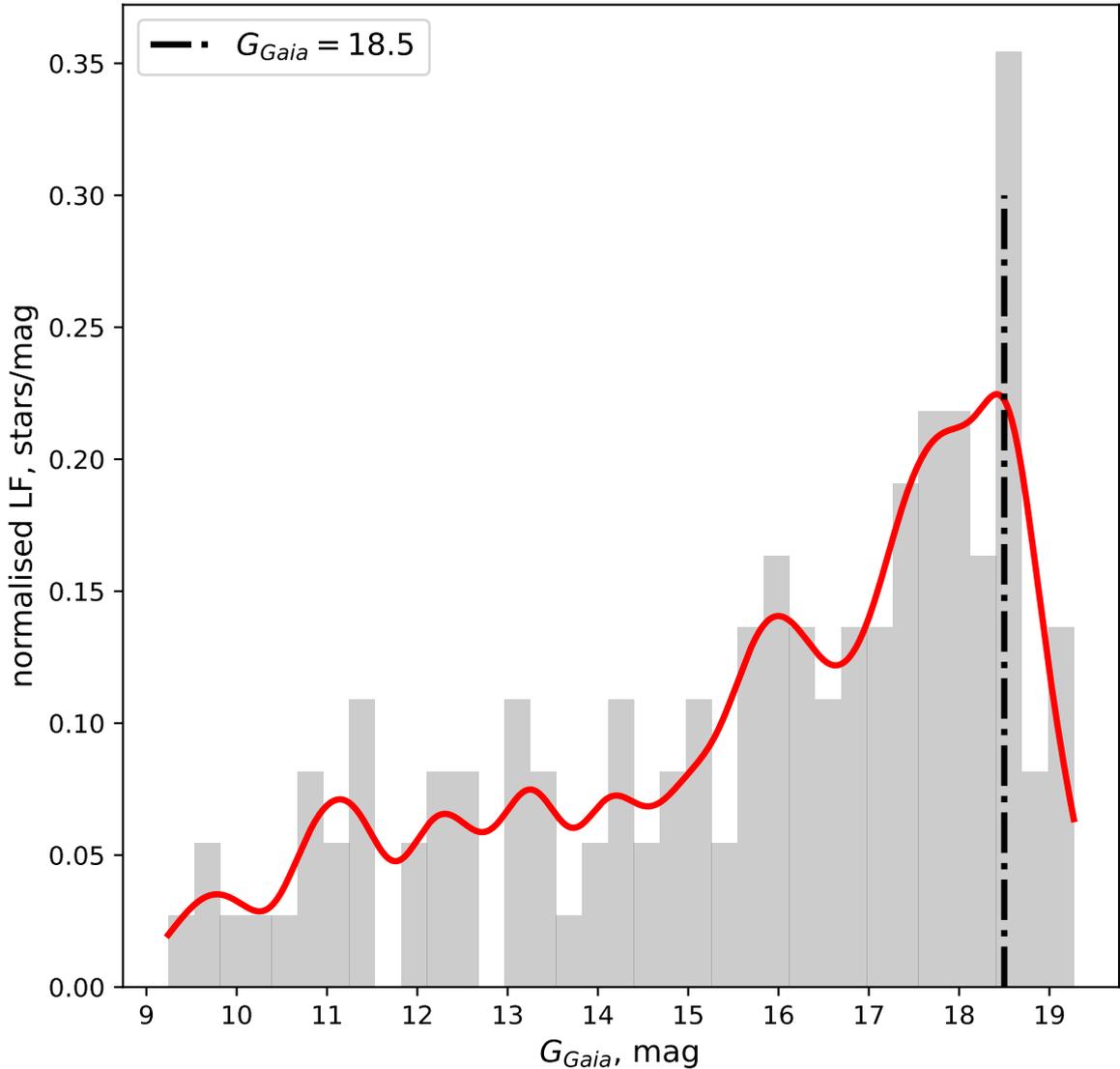


Рисунок 2.6 — Нормированное распределение звездных величин Gaia G для звезд с вероятностью принадлежности скоплению NGC 225 $> 50\%$.

Штрихпунктирной линией отмечен предел $G_{Gaia} = 18^m,5$.

Мы оценили массу скопления для двух различных значений доли двойных звезд α .

2.6.1 Доля двойных звезд $\alpha = 0$

Рассмотрим случай отсутствия двойных звезд в скоплении, то есть $\alpha = 0$. Чтобы оценить массу скопления до $G_{Gaia} = 18^m,5$, мы сначала вычислили абсолютную звездную величину каждой звезды в фильтре G_{Gaia} , используя модуль расстояния $(m - M)_G = 9.90 \pm 0.06$ (см. Раздел 2.5). Затем с помощью интерполяции сплайнами данных теоретических изохрон [93] была найдена функция преобразования абсолютной звездной величины в массу $M(G_{Gaia})$. Суммируя массы всех звезд с видимой звездной величиной $G_{Gaia} \leq 18^m,5$, мы получили массу скопления \mathcal{M}_0 . Добавляя и вычитая 0.06 из $(m - M)_G$ в соответствии с погрешностью модуля расстояния и повторяя расчеты, мы получили погрешность массы скопления. Мы не учитывали ошибки соотношения масса-светимость, заложенные в изохроне. Таким образом, $\mathcal{M}_0 = 126.6 \pm 1.7 M_\odot$ для изохроны с $\log \tau = 8.0$, а $\mathcal{M}_0 = 125.3 \pm 1.6 M_\odot$ для изохроны с $\log \tau = 8.2$. Масса, соответствующая $G_{Gaia} = 18^m,5$, равна $\mathcal{M}_{lim} = 0.54 M_\odot$ при $\log \tau = 8.0$ и $\mathcal{M}_{lim} = 0.53 M_\odot$ при $\log \tau = 8.2$.

Зная распределение массы вплоть до $G_{Gaia} = 18^m,5$ и применяя ядерную оценку плотности с ядром Гаусса и параметром ширины полосы, равном 0.2, мы построили функцию масс скопления (см. 2.7). Затем, применяя метод наименьших квадратов к логарифмической функции масс в диапазоне масс $0.8 M_\odot < \mathcal{M} < 1.9 M_\odot$, мы нашли коэффициент наклона a . Учитывая неопределенность в $(m - M)_G$ и пересчитывая с ее учетом массу каждой звезды как для $\log \tau = 8.0$, так и для $\log \tau = 8.2$, окончательно получили $a = -2.53 \pm 0.02$.

Стандартная начальная функция масс Солпитера имеет наклон $a = -2.35$, в то время как Крупа [100] предложил $a = -1.3 \pm 0.5$ для звезд с массой $0.08 M_\odot < \mathcal{M} < 0.5 M_\odot$, $a = -2.3 \pm 0.3$ для $0.5 M_\odot < \mathcal{M} < 1 M_\odot$ и $a = -2.3 \pm 0.7$ для диапазона масс $\mathcal{M} > 1 M_\odot$.

2.6.2 Доля двойных звезд $\alpha = 0.52$

Доля двойных звезд $\alpha = 15/29 \approx 0.517$ – это результат, полученный нами в разделе 2.4 для звезд с вероятностью принадлежности более 50%.

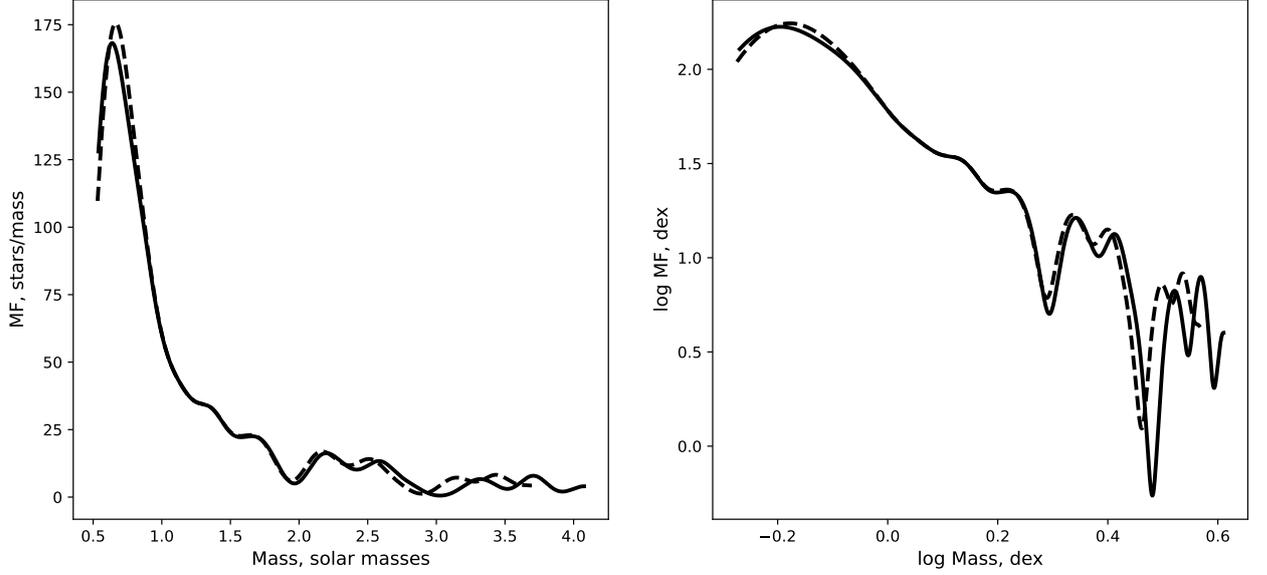


Рисунок 2.7 — Левая панель: функция масс, полученная с использованием изохроны Gaia $\log \tau = 8.0$ (черная линия) и $\log \tau = 8.2$ (черная пунктирная линия). Правая панель: то же, но в логарифмическом масштабе.

Мы использовали ту же систему уравнений, которая была приведена в [63], а именно:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = L_1 + L_2, \\ L_1 = L(\mathcal{M}_1), \\ L_2 = L(\mathcal{M}_2), \\ q = \mathcal{M}_2/\mathcal{M}_1, \\ \mathcal{M} = \mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2, \end{array} \right. . \quad (2.1)$$

где L и \mathcal{M} — полная светимость и полная масса двойной системы, L_1 , L_2 и $\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2$ — светимость и масса компонентов, при этом $\mathcal{M}_1 \geq \mathcal{M}_2$ и поэтому $0 < q \leq 1$.

Мы также использовали следующее уравнение из [101]:

$$\log L = -0.705 \times (\log \mathcal{M})^2 + 4.655 \times (\log \mathcal{M}) - 0.025 \quad (2.2)$$

Используя изохроны из [93] и полученный ранее модуль расстояния ($m - M$)_G, мы преобразовали звездные величины G_{Gaia} в светимости L . Чтобы найти

Таблица 14 — Суммарная масса скопления, ее дисперсия и множитель увеличения массы скопления ν .

distribution	$\log\tau$,	\mathcal{M}_α ,	$\sigma_{\mathcal{M}_\alpha}$,	ν ,
		M_\odot	M_\odot	
q=1	8.0	170.5 ± 2.2	4.5	1.35
	8.2	168.6 ± 2.3	4.8	1.35
плоское	8.0	155.2 ± 2.0	3.7	1.23
распределение	8.2	153.6 ± 1.9	3.6	1.23

решение уравнения (2.1), мы использовали алгоритм оптимизации из библиотеки Python SciPy [102] и минимизировали следующую функцию, используя усеченный алгоритм минимизации Ньютона:

$$y = |L - 10^{L(\mathcal{M}_1)} - 10^{L(q\mathcal{M}_1)}| \quad (2.3)$$

В предположении, что доля двойных не зависит от интервала звездных величин (и, следовательно от массы), мы можем рассматривать α как вероятность того, что случайно выбранная звезда окажется двойной. Таким образом, мы можем присвоить каждой звезде значение β , случайно выбранное из интервала $[0, 1]$. Когда β оказывается $\leq \alpha$, мы рассматриваем эту звезду как двойную и применяем алгоритм минимизации, чтобы найти \mathcal{M}_1 , а затем $\mathcal{M} = \mathcal{M}_1 \times (1+q)$. В противном случае мы приписываем ей массу одиночной звезды, как описано в разделе 2.6.1. Повторив эту процедуру для 1000 прогонов, мы нашли средние значения общей оценки массы скопления \mathcal{M}_α . Разделив это значение на массу \mathcal{M}_0 , рассчитанную в разделе 2.6.1, мы получили множитель увеличения массы скопления ν за счет двойных звезд.

Мы рассмотрели два случая распределения q : $q = 1$ и плоское распределение q . В последнем случае после каждого вычисления \mathcal{M}_1 проверялось, не превышает ли значение $\mathcal{M}_1 \times q$ $0.08 M_\odot$. Если это условие не выполнялось, значение q выбиралось снова. Расчеты проводились для всех звезд с $G_{Gaia} \leq 18^m, 5$. Погрешность массы скопления рассчитывалась с учетом погрешности модуля расстояния. Результаты представлены в Таблице 14. Подчеркнем, что разница между двумя значениями возраста ($\log \tau = 8.0$ и $\log \tau = 8.2$) незначительна и находится в пределах неопределенностей.

Для случая $q = 1$ мы рассчитали общую массу 29 звезд, статус двойственности для которых мы определили, используя спектроскопические критерии.

Поскольку для них было установлено, какие звезды являются двойными, а какие - одиночными, мы могли вычислить их массу и сравнить результаты, полученные при случайном выборе двойных звезд. Разница не превышала $4 M_{\odot}$ для всех случаев и составляла менее 5%.

Полученные множители увеличения массы скопления ν хорошо согласуются со значениями, найденными Бородиной и др. [63], где при $\alpha \approx 0.5$ ν оказалось равным примерно 1.2 для «реалистичных» распределений q , включая плоское распределение, и $\nu \approx 1.35$ для $q=1$.

В этом исследовании мы рассматривали только двойные, а не кратные системы. В работе Бородиной и др. [103] показано, что учет тройных и четверных систем значительно увеличивает ν . Поэтому наши оценки, особенно для плоского q -распределения, следует рассматривать как нижний предел.

2.7 Выводы

В данной главе мы изучали рассеянное звездное скопление NGC 225 и исследовали, как наличие двойных звезд среди членов скопления влияет на общую массу скопления. Основные результаты нашего исследования можно резюмировать следующим образом:

- Используя данные Gaia DR2 и применив кластерный анализ к собственным движениям и параллаксам звезд, мы получили список вероятных членов скопления. Все 29 ярчайших звезд из этого списка имеют вероятность членства более 50 процентов. Формируя список звезд с этим значением вероятности или выше, мы гарантируем, что список ярких звезд будет полным.
- Мы использовали спектроскопические наблюдения, снятые в 1990-1991 и 2019-2020 годах, и получили лучевые скорости для 29 самых ярких членов скопления вплоть до $G = 13^m,4$ в фильтре G Gaia EDR3. Доля двойных звезд среди этих 29 звезд оказалась $\alpha = 0.52$. Полученная нами средняя лучевая скорость скопления составляет $\langle V_r \rangle = -9.8 \pm 0.7$ км с⁻¹.
- Мы рассчитали отношение полного поглощения к селективному, $R_V = A_V/E(B - V)$ и получили $R_V = 3.03 \pm 0.02$.

- Методом наложение теоретических изохрон по фотометрическим данным мы получили фотометрическое расстояние $D = 667 \pm 18$ пк, возраст $\log \tau = 8.0-8.2$ и избыток цвета $E(B - V) = 0^m,29 \pm 0.01$.
- Расчет массы скопления выполнен до $G_{Gaia} = 18^m,5$ для двух значений доли двойных звезд: $\alpha = 0$ и $\alpha = 0.52$ (15 звезд из 29). Мы использовали изохроны для определения массы одиночных звезд, а в случае $\alpha = 0.52$ мы применили моделирование методом Монте-Карло. Мы рассмотрели два типа распределения масс в двойных системах: «плоское» и случай равных масс компонентов. Результаты оценок полной массы вплоть до величины $G = 18^m,5$ Gaia EDR3 варьируются от $\mathcal{M}_0 = 125.3 \pm 1.7 M_\odot$ для случая $\alpha = 0$ до $\mathcal{M}_\alpha = 155.2 \pm 2.0 M_\odot$ («плоское» распределение массы) и $\mathcal{M}_\alpha = 170.5 \pm 2.2 M_\odot$ (равные компоненты массы) для случая $\alpha = 0.52$. Сравнение показывает, что масса скопления увеличивается от 1.23 до 1.35 раза, если наличие двойных звезд принимается во внимание.

Глава 3. Исследование рассеянных звездных скоплений FSR 866, NGC 1960 и Stock 2¹

Как и в предыдущей главе, мы использовали фотометрические и спектроскопические методы для исследования, в этот раз, трех рассеянных звездных скоплений различного возраста для определения доли двойных звезд.

FSR 866 - старое рассеянное скопление в созвездии Близнецов. Тем не менее, в литературе существуют неоднозначности в оценках основных параметров этого скопления, см. Таблицу 15. Второе объект - это хорошо известное относительно молодое скопление NGC 1960 (M 36). Это РЗС представляет интерес для исследований с точки зрения изучения образования экзопланет, поскольку все оценки возраста скопления сгруппированы в диапазоне 10 - 30 млн лет, что соответствует моменту когда, согласно современным моделям формирования планет, каменные планеты, вероятно, достигают своих окончательных масс ([104]). M 36 также было объектом для поиска и исследования характеристик околозвездных дисков ([105]). Третье изученное нами РЗС - Stock 2, довольно близкое и поэтому содержащее большое число ярких звезд, для которых можно получить надежные спектральные данные. В Таблице 15 приводятся характеристики трех РЗС, полученные разными авторами.

Как можно понять из этой таблицы, в литературе существует недостаток спектральных данных по всем трем скоплениям, и по этой причине средние лучевые скорости демонстрируют довольно значительное разброс. Хотя фотометрические параметры РЗС, полученные разными авторами, показывают несколько лучшее согласие, в этом исследовании мы решили их заново определить, чтобы затем использовать однородные данные для оценки доли двойных звезд. Для этой цели первым делом нам нужно получить информацию о принадлежности звезд к скоплению.

¹Данная Глава диссертации написана на основе работы №1 из списка публикаций автора по теме диссертации.

Таблица 15 — Сравнение параметров РЗС FSR 866, NGC 1960 и STOCK 2 из литературы.

Скопление	$\log(\text{Age}/\text{yr})$	Расстояние, пк	V_r , км с ⁻¹	Ссылки	Замечания
FSR 866	9.57	1215	65.55	[57]	Лучевая скорость определена по 2 звездам
	9.31	1211	65.46	[17]	Лучевая скорость определена по 2 звездам
	9.26	1503	52.04	[106]	
	9.33	1250		[107]	
	9.60	≈ 1245		[108]	Приведенное расстояние приблизительно посчитано из параллакса = 0.803 mas
NGC 1960	7.20	1300		[109]	
	7.48	1086		[57]	По 285 вероятным членам скопления
			7.03	[17]	По 1 звезде
	7.45	1162		[107]	По данным GAIA DR2, по 280 звездам чья вероятность членства в скоплении $\geq 70\%$
	7.565	1200	-12.09	[106]	По данным каталога LAMOST, членство звезд из [2]
				[110]	Новый метод обнаружения двойных звезд; доля двойных = 0.66
	7.44	1170		[111]	Комплексное исследование на основе кинематических данных Gaia DR2.
				[112]	Параметры семи РЗС были получены с помощью метода ядерной оценки плотности (KDE) и моделирования N-тел.
7.34			[113]	Оценка возраста на основе зависящего от возраста положения «границы истощения лития».	
7.3			[114]	Оценка возраста получена на основе подбора изохрон до главной последовательности	
7.30	≈ 1180		[108]	По 360 членам скопления; приведенное расстояние грубо посчитано из параллакса = 0.845 mas	
Stock 2	8.905	374	8.757	[57]	По 1157 членам скопления, 185 измерений лучевых скоростей
			8.61	[17]	По V_r измерениям Gaia-RVS и наземным исследованиям, 177 звезды
	8.65		8.0	[115]	Исследование основано на спектроскопии высокого разрешения и спектроскопии HARPS-N.
	8.44	400	1.55	[106]	По данным LAMOST
	8.60	399		[107]	По 1178 звездам с вероятностью членства в скоплении $> 50\%$
	8.60	375		[116]	Направлен на поиск химически пекулярных звезд.
			7.08	[117]	По данным о лучевых скоростях из APOGEE
			-17.39	[118]	Лучевая скорость найдена из изучения одного красного гиганта, доля двойных = 0.67
8.45	≈ 374		[108]	По 1471 вероятным членам скопления; расстояние грубо посчитано из параллакса = 2.674 mas	

3.1 Алгоритм кластеризации

Вероятные члены скопления были идентифицированы с использованием методов кластерного анализа. Кластеризация проводилась в трехмерном пространстве собственных движений и параллаксов из Gaia DR3 [18]. Учитывались только данные с ошибками параллакса меньше 20 процентов. Мы использовали ту же технику, что описана в 2.1, а именно реализацию на Python алгоритма DBSCAN (основанная на плотности пространственная кластеризация для приложений с шумами), предоставляемую библиотекой SCIKIT-LEARN ([48]). DBSCAN требует двух основных параметров – eps , максимальное расстояние между двумя точками, при котором одна из них считается соседней другой, и $min_samples$, минимальное количество точек в окрестности конкретной точки, чтобы она считалась основной точкой. Перед кластеризацией координаты масштабировались до единичной дисперсии, а также был применен анализ главных компонент для исключения возможных зависимостей между координатами. Этот подход также приводит к тому, что параметр eps становится безразмерным. Мы запускали DBSCAN для набора параметров eps и $min_samples$. Диапазон для параметра eps для всех скоплений составлял [0.01, 0.99].

Пределы тестирования $min_samples$ были найдены для каждого из этих трех рассеянных скоплений отдельно как диапазон, в котором в результате кластеризации образуются две группы - скопление, как группа физически связанных звезд, и звезды фона.

Группа, состоящая из звезд скопления, была идентифицирована путем сравнения средних значений собственных движений и параллаксов группы с соответствующими значениями, указанными в каталоге Диаса и др. [57]. Пределы для $min_samples$ зависят от размера скопления и для наших рассеянных скоплений они оказались следующими: FSR866 - [1, 350], NGC1960 - [1, 750], Stock2 - [1, 2050]. Шаг изменения параметра eps равен 0.01, а для $min_samples$ равен 1. Однако из-за большого размера и, следовательно, большого количества объектов в случае Stock2 шаг в eps был увеличен до 0.03, а в $min_samples$ – до 20.

Когда были завершены все N запусков, соответствующих критерию (дающие ровно две группы звезд), вероятность того, что звезда является членом рассеянного скопления, вычислялась как количество раз, когда звезда была помечена как член скопления в этих N запусках, деленное на само число N . Затем

мы присвоили индексы вероятным членам скопления в порядке убывания их G_{mag} -величины из Gaia DR3.

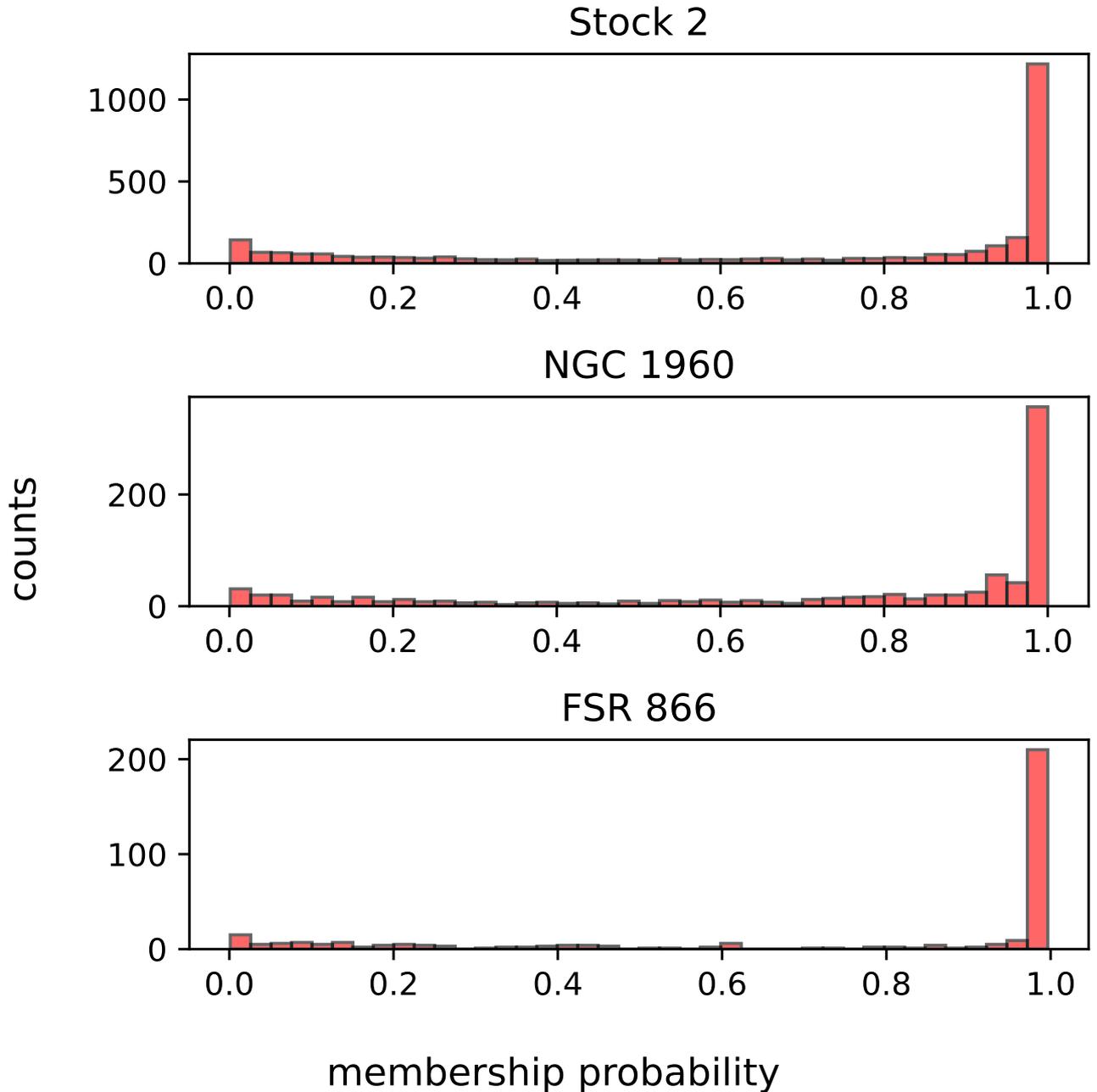


Рисунок 3.1 — Распределение вероятностей принадлежности звезд в области к скоплению Stock 2, NGC 1960 и FSR 866. Пороговый уровень вероятности выбирался вручную в области, где начинается резкий рост числа вероятных членов. Для Stock 2 и NGC 1960 этот порог равен 0.95, а для FSR 866 — 0.985.

Распределение вероятностей членства для Stock 2, NGC 1960 и FSR 866 показано на рисунке 3.1. Несмотря на сильные пики, близкие к единице, общее число членов скопления среди всех звезд сопоставимо для всех скоплений с

числом звезд поля: около 49% звезд-членов для Stock 2 ($P \geq 0.95$), 45% для NGC 1960 ($P \geq 0.95$) и 62% для FSR 866 ($P \geq 0.985$).

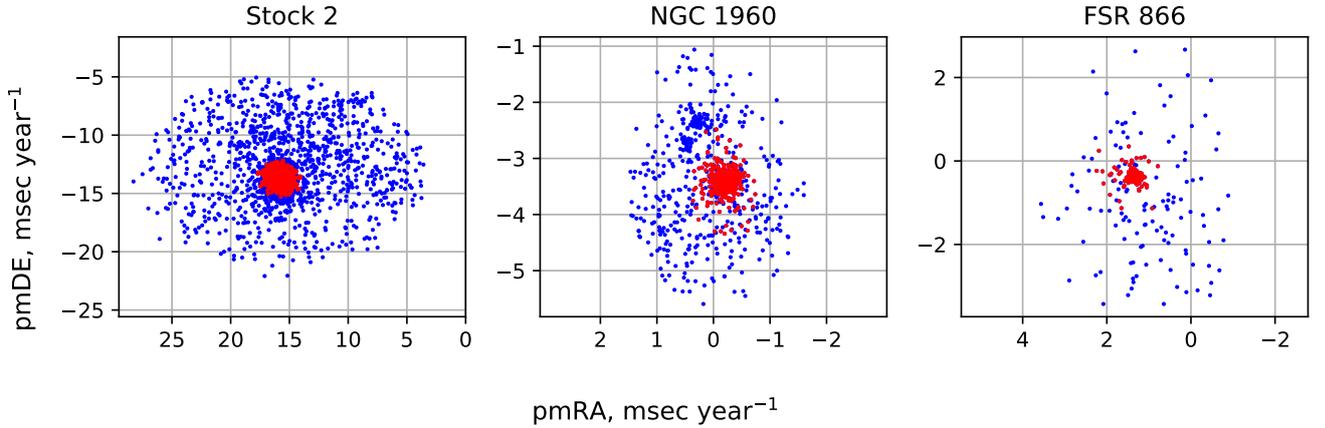


Рисунок 3.2 — Распределение собственных движений членов скопления (красные точки) и звезд поля (синие точки) в области скоплений Stock 2, NGC 1960 и FSR 866, полученное на основе вероятности членства. Пороговое значение вероятности принадлежности звезд к скоплению составляет 0.95, 0.95 и 0.985 соответственно. Собственные движения взяты из Gaia DR3. На средней панели, соответствующей NGC 1960, видны две концентрации звезд помимо скопления, которые обсуждаются в Разд. 3.1

На рисунке 3.2 показано положение возможных членов (красные кружки) и звезд поля (синие точки) в пространстве собственного движения, где члены, как и ожидалось, занимают гораздо меньшую площадь.

Как можно легко заметить, на диаграмме собственного движения в направлении скопления NGC 1960 помимо звезд скопления ясно выделяются две концентрации: группа А вокруг $(0.25, -2.3)$ мсд год $^{-1}$ и группа В примерно на $(0.25, -2.7)$ мсд год $^{-1}$. Используя тот же метод кластеризации, что и для трех изученных рассеянных скоплений, мы выделили звезды, принадлежащие этим группам. Сначала мы исключили из выборки звезды в поле NGC 1960, вероятность членства которых в скоплении составляет более 95%. Затем мы рассмотрели варианты кластеризации для оставшихся звезд в пространстве собственных движений и параллакс для параметров кластеризации $0 < eps < 1$ с шагом 0.01, $1 < min_samples < 100$ с шагом 1. Мы выбрали те параметры, при которых в результате алгоритма кластеризации получаются 3 группы: группы А и В и группа фоновых звезд. Мы оставили звезды, которые были помечены как принадлежащие к группам хотя бы в половине случаев, и получили список из 51 звезды для группы А и 28 звезд для группы В (Таблицы 16 и

17 соответственно). Рисунки 3.3, 3.4 и 3.5 показывают положения звезд-членов двух групп в сравнении со звездами NGC 1960 в пространстве собственных движений, на гистограмме расстояний и на диаграмме «цвет-звездная величина». Таблица 18 содержит средние собственные движения и средние геометрические расстояния групп А и В из ([94]). Как можно заметить, объекты для этих групп в среднем находятся на большем расстоянии, чем звезды NGC 1960. Диаграммы цвет-величина совпадают с диаграммой NGC 1960, но указывают на немного большее смещение по оси ординат в сторону больших звездных величин, что соответствует немного большему модулю расстояния. Мы не нашли никаких упоминаний об этих группах в литературе.

3.2 Фотометрическое расстояние и возраст

Для определения доли двойных звезд в рассеянном скоплении с помощью фотометрического метода мы сначала оценили расстояние и возраст каждого скопления. Мы получили параметры скопления путем совмещения звезд главной последовательности с теоретическими изохронами PARSEC + COLIBRI ([93]), предварительно исправив данные фотометрии для каждой звезды за покраснение с использованием избытков цвета из 3D-карты пыли Bayestar ([95]). Результаты подбора изохрон рассеянных скоплений Stock 2, NGC 1960 и FSR 866 показаны на рисунке 3.6. Для получения значения $E(B - V)$ в качестве входных параметров необходимы расстояние и координаты звезды. Используя данные о расстоянии от [94], мы получили оценку избытка цвета $E(B - V)$ для каждой звезды из списков предполагаемых звезд-членов скоплений, а затем преобразовали его в избыток цвета Gaia $E(G_{BP} - G_{RP})$ с использованием соотношения: $E(G_{BP} - G_{RP}) = 3.1 * E(B - V) * 0.44898$. Значение коэффициента 0.44898 применимо для звезды класса G2V, см. например [52] и [119]². Металличность $[Fe/H]$ изохрон подбиралась в соответствии со значением, указанным в работе [57].

²http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd_3.7

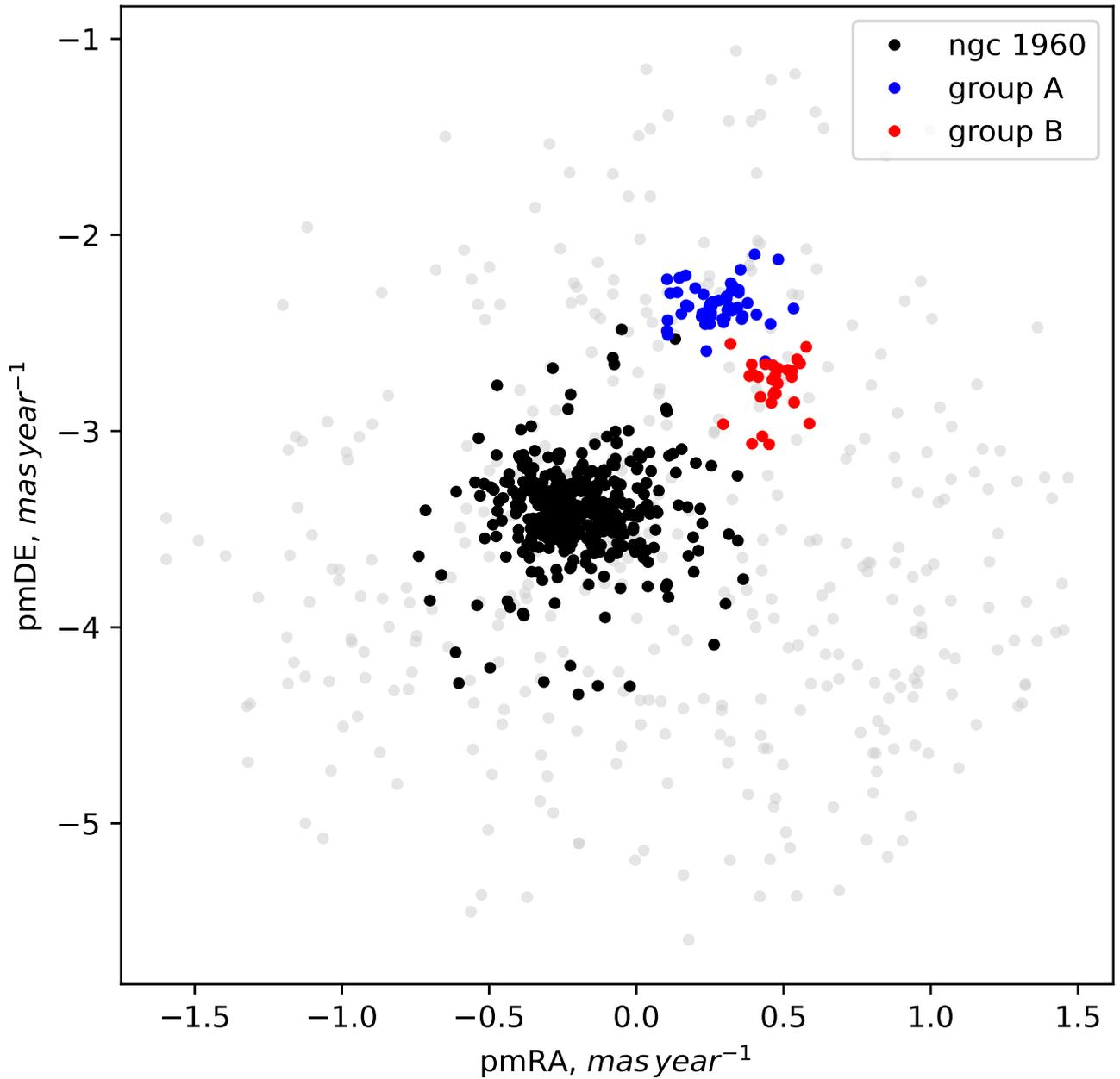


Рисунок 3.3 — Распределение собственных движений звезд в поле скопления NGC 1960. Звезды NGC 1960 изображены черными точками, а звезды групп А и В — синими и красными точками соответственно.

3.3 Доля двойных звезд по фотометрическим данным

Двойная система, состоящая из двух звезд главной последовательности, ярче, чем каждый из ее компонентов, и краснее, чем самый яркий из них, поэтому она лежит в стороне от главной последовательности на диаграмме «цвет-звездная величина». Разница в цветах и величинах зависит от отношения

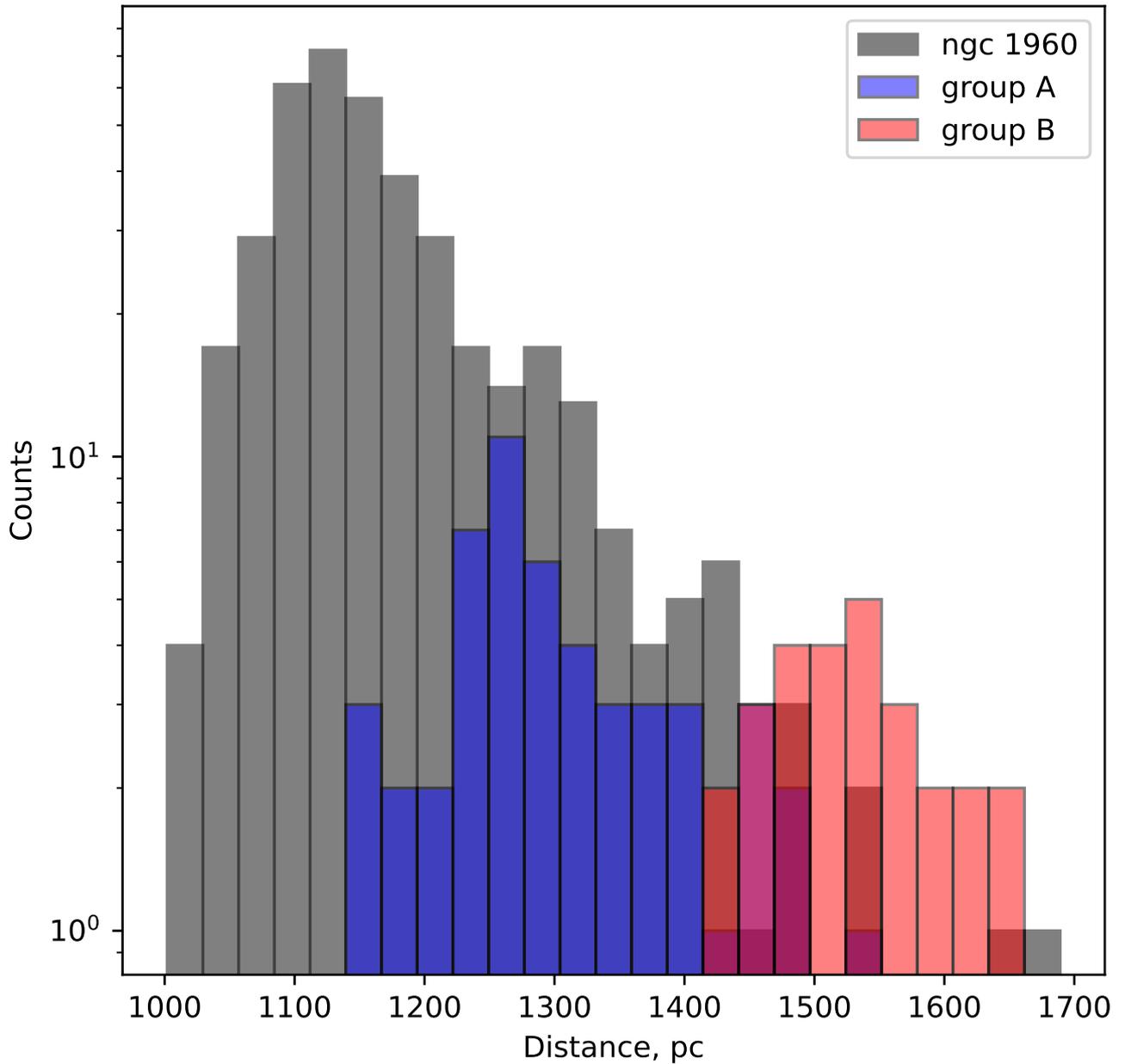


Рисунок 3.4 — Распределение расстояний звезд в поле NGC 1960. Цвета такие же, как на рис. 3.3. На основе геометрических расстояний из [94].

масс $q = M_2/M_1 \leq 1$ (где M_1 и M_2 - массы первичного и вторичного компонентов). В частном случае системы с равными массами ($q = 1$) это приводит к смещению примерно на 0.75 звездной величины выше главной последовательности. Когда $q \rightarrow 0$, положение двойной системы будет приближаться к главной последовательности, поскольку влияние менее яркого компонента станет незначительным. Для анализа положений звезд на диаграмме «цвет-звездная величина» необходимо определить модуль расстояния скопления и найти положение двойных звезд в зависимости от отношения масс q .

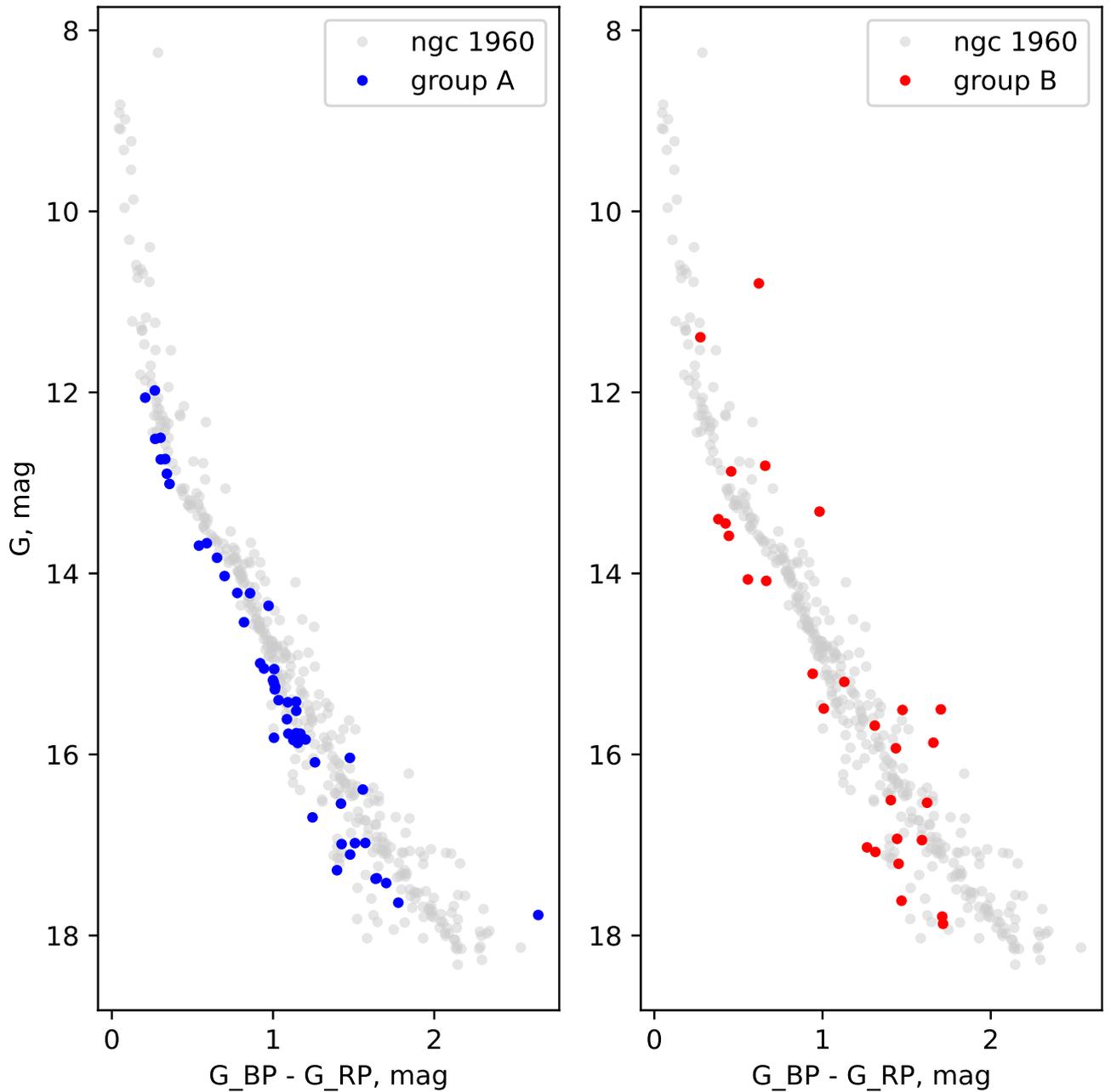


Рисунок 3.5 — Диаграмма «цвет-звездная величина» для групп А и В в сравнении со звездами NGC 1960 (серые точки). Цвета для двух групп такие же, как на рис. 3.3.

Оценка доли двойных систем была получена с использованием подхода, описанного в [120], [121] и [122]. Сначала мы использовали предварительно рассчитанные теоретические изохроны PARSEC + COLIBRI ([93]), чтобы определить область на диаграмме «цвет - звездная величина», где лежат как одиночные, так и двойные звезды скопления с $G_{\text{RP}}^{\text{low}} \leq G_{\text{RP}} \leq G_{\text{RP}}^{\text{high}}$. Мы выбрали изохрону соответствующего возраста и металличности, как это было описано в Разделе 3.2, и рассчитали новые изохроны, соответствующие положению двой-

Таблица 16 — Gaia DR3 идентификаторы для звезд группы А.

3449535625534281728	3449540337117675904
3449537584039369216	3449545662877131264
3449620219212841856	3449621593602450304
3449537760137369984	3449538649192368256
3449541844646924160	3449532640536358400
3449525047034490752	3449527830173281920
3449538065075704448	3449582874473917696
3449538030715966848	3449519682618909952
3449525081394227712	3449308438947124480
3449534599041515776	3449537828856836224
3449621494819206784	3449513845759836160
3449537931936045696	3449542394404128000
3449635925909191424	3449537622698406784
3449525356272153856	3449526661942171776
3449297516845882752	3449534599041515008
3449535732912829184	3449525837304812288
3449558032383111552	3449540642057682432
3449537622698406272	3449526593222697600
3449620425371207936	3449583767827067264
3449621357380259456	3449294660691797632
3449321018906842624	3449538030717064064
3449427461081258752	3449539576905628416
3449537897576312064	3449527516639376000
3449622078934767360	3449524561701743360
3449524943955265920	3449588573892846336
3449306725255687808	

ных звезд с заданным соотношением q . Затем мы разделили указанную область на диаграмме «цвет-звездная величина» на две части: одну с преобладанием одиночных звезд главной последовательности и вторую, выше главной последовательности, содержащую кандидатов в двойные звезды. Граница проходила по пороговому значению \tilde{q} . Кордони и др. [122] использовали $\tilde{q} = 0.6$ или 0.7 в зависимости от скопления. Кажется разумным не использовать слишком малые значения q из-за возможных фотометрических ошибок, поэтому мы провели

Таблица 17 — Gaia DR3 идентификаторы для звезд группы В.

3449502335247586432	3449625068231967616
3449511440578192256	3449511612376874112
3449411793037536640	3449588578190417024
3449316483421323776	3449413584041915648
3449428423152996864	3449524394195803520
3449424166841367296	3449519407740951424
3449427396656719488	3449315693147337728
3449427293577508224	3449518656123440384
3449314078239645184	3449299711573599744
3449431176227952256	3449317926530426368
3449325726190988800	3449520541612289536
3449619742472525184	3449588956147535360
3449531021330051712	3449321564367376000
3449436325893248256	3449514597377360000

Таблица 18 — Среднее собственное движение, геометрическое расстояние и его стандартное отклонение для групп А и В. Расстояния взяты из ([94]).

Group	$\langle \text{pmRA} \rangle$ mas yr ⁻¹	$\langle \text{pmDE} \rangle$ mas yr ⁻¹	$\langle \text{rgeo} \rangle$ pc	std(rgeo) pc
A	0.275	-2.358	1302.5	91.5
B	0.462	-2.771	1536.3	69.0

расчеты для набора $\tilde{q} = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$. Звезды, положение которых на диаграмме «цвет - звездная величина» соответствует положению двойных систем с равными или большими значениями \tilde{q} , предполагаются кандидатами в двойные звезды. Мы ограничили исследования областью ниже точки поворота с главной последовательности (см. Раздел 3.2). Пары значений ($G_{\text{RP}}^{\text{low}}, G_{\text{RP}}^{\text{high}}$) для скоплений оказались ($14^m.3, 22^m.9$) для FSR 866, ($8^m.5, 21^m.8$) для NGC 1960 и ($9^m.2, 20^m.8$) для Stock 2.

Затем мы определили границы вокруг изучаемого сегмента главной последовательности, в пределах которого мы изучали звезды скопления на диаграмме «цвет-звездная величина» для определения доли двойных. Чтобы установить левую и правую границы области, мы рассчитали стандартное отклонение цвета σ_{color} на основе внутренних ошибок цвета и ошибок из Bayestar ([95]) следующим образом: (1) для оценки ошибки, связанной с [95], мы ис-

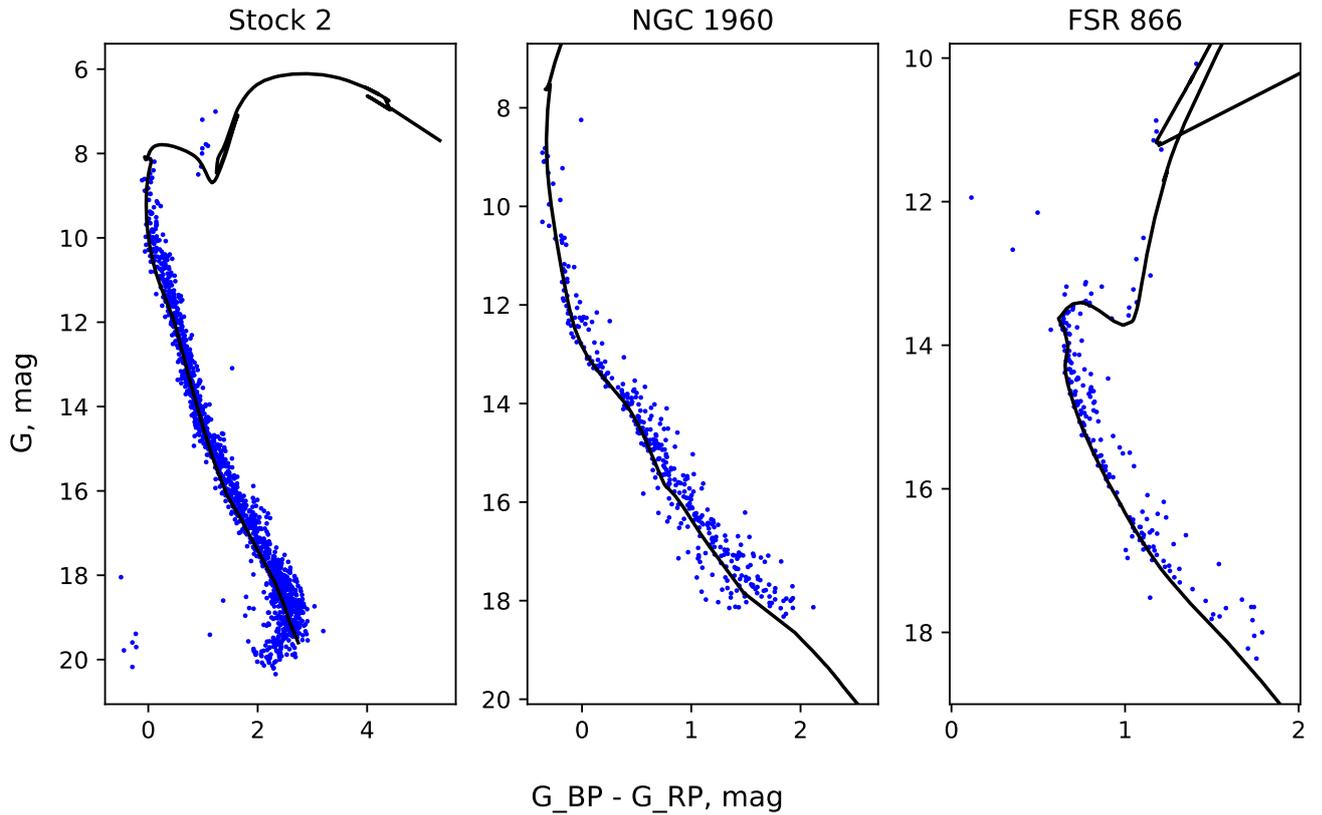


Рисунок 3.6 — Диаграммы «цвет-звездная величина» для Stock 2, NGC 1960 и FSR 866, построенные по звездам с вероятностью принадлежности к скоплению $P > 0.95$ для Stock 2, NGC 1960 и $P > 0.985$ для FSR 866. Цвета исправлены за индивидуальные покраснения звезд. Мы получили следующие параметры: (DM_G — модуль расстояния в фильтре Gaia G): Stock 2: $\log(\text{Age/yr}) = 8.5$, $E(B - V) = 0.336$, $DM_G = 9^m.2$, расстояние = 463 пк; NGC 1960: $\log(\text{Age/yr}) = 7.48$, $E(B - V) = 0.27$, $DM_G = 11^m.1$, расстояние = 1202 пк; FSR866: $\log(\text{Age/yr}) = 9.57$, $E(B - V) = 0.05$, $DM_G = 10^m.75$, расстояние = 1331 пк.

пользовали данные об избытке цвета для звезд, соответствующих расстояниям из каталога Bailes-Jones ([94]). Затем для каждой звезды расстояния были исправлены путем добавления и вычитания значений ошибок. Разница между измеренным избытком цвета [95] и соответствующим значением с учетом ошибки расстояния была определена для каждой звезды. Мы выбирали максимальное значение между этими двумя величинами для каждой звезды. Затем было рассчитано среднее значение для всех звезд с вероятностью членства, превышающей определенный порог, обозначенный как \tilde{p} , который варьируется от скопления к скоплению. (2) Ошибка цвета Gaia для каждой звезды была рассчитана согласно уравнению 12 в [123], с использованием потоков в Gaia

BP и RP и соответствующих ошибок потоков. Средняя ошибка была рассчитана для всех звезд с вероятностью членства, превышающей упомянутый выше порог \tilde{p} . (3) Наконец, общая ошибка, обозначенная как σ_{color} , была получена путем взятия квадратного корня из суммы квадратов ошибки Bayestar ([95]) и ошибки цвета Gaia.

Чтобы установить границы, как и в [122] мы сместили главную последовательность на четыре σ_{color} в сторону синего цвета для левой границы, а линию $q = 1$ на четыре σ_{color} в красную сторону от ее первоначального положения для правой границы. Верхняя и нижняя границы области изучения соответствуют линии двойных звезд с q во всем диапазоне $0 \leq q \leq 1$ (рассчитанные с шагом $\Delta q = 0.1$ и интерполированные с помощью сплайнов), для которых величина основного компонента звезды равна G_{RP}^{high} и G_{RP}^{low} соответственно.

Все звезды внутри этих границы предполагаются принадлежащими к скоплению, при этом звезды правее линии $q = \tilde{q}$ предполагаются двойными. Линия, соответствующая $q = \tilde{q}$, была рассчитана с использованием фотометрической информации из ранее наложенных изохрон.

На рисунке 3.7 показана исследуемая область для скоплений Stock 2, NGC 1960 и FSR 866 для случая $\tilde{q} = 0.6$. Звезды в области $q < 0.6$ отмечены зеленым цветом, а в области двойных звезд $q \geq 0.6$ - красным.

Доли двойных звезд затем просто рассчитывались как количество звезд в области $q \geq \tilde{q}$, $N_{q \geq \tilde{q}}$, деленное на общее количество звезд в исследуемой области, N_{total} :

$$f_{bin} = \frac{N_{q \geq \tilde{q}}}{N_{total}} \quad (3.1)$$

Мы повторили описанные выше шаги в широком диапазоне возможных порогов вероятности членства от 0.8 до 1, чтобы отслеживать зависимость доли двойных звезд от выбора членов скопления. Эти зависимости показаны на рисунке 3.8. Зависимость можно описать как примерно постоянное значение (плато) или как небольшие колебания вокруг среднего и резкое изменение доли двойных звезд, когда пороговая вероятность приближается к единице, когда в качестве членов скопления рассматриваются только наиболее вероятные кандидаты.

Результаты оценок долей двойных звезд для различных \tilde{q} представлены в Таблице 19.

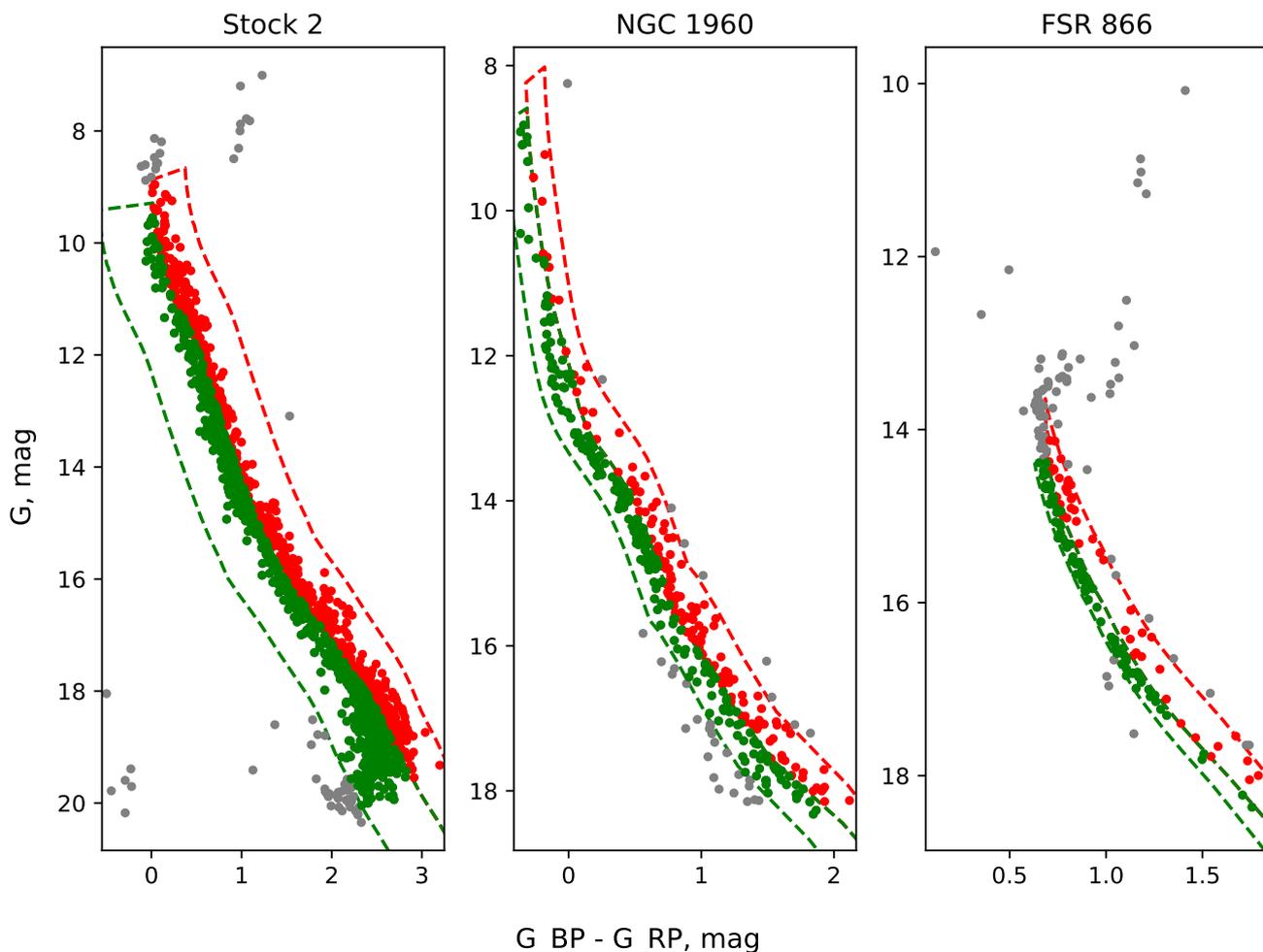


Рисунок 3.7 — Области на диаграмме «цвет-звездная величина» для рассеянных скоплений Stock 2, NGC 1960 и FSR 866, выделенные из числа звезд с вероятностью членства $P > 0.95$, $P > 0.95$ и $P > 0.985$ соответственно, где исследовалась доля двойных звезд. Пунктирными линиями отмечены границы исследуемых областей. Для более подробной информации о их нахождении см. разд. 3.3. Серые точки - звезды за пределами области. Зеленые точки - звезды в области ниже линии $q = 0.6$, в то время как красные - в области выше линии $q = 0.6$, которая считается содержащей двойные звезды главной последовательности. Цвета предварительно исправлены за покраснение.

3.4 Спектроскопические наблюдения и обработка данных

Мы использовали спектроскопические данные, полученные в ходе наблюдений в период с 2019 по 2021 год, проведенных в Астрофизической обсерватории Азиаго, Италия. Мы использовали 122-сантиметровый телескоп

Таблица 19 — Доля двойных систем в зависимости от выбора порогового значения отношения масс \tilde{q} .

Скопление	Доля двойных звезд				
	$\tilde{q} = 0.5$	$\tilde{q} = 0.6$	$\tilde{q} = 0.7$	$\tilde{q} = 0.8$	$\tilde{q} = 0.9$
FSR 866	0.54	0.35	0.25	0.17	0.13
NGC 1960	0.58	0.4	0.27	0.17	0.1
Stock 2	0.55	0.44	0.32	0.21	0.14

Галилео, оснащенный спектрографом Boller&Chivens + CCD с дифракционной решеткой 1200 линий/мм и диапазоном $\lambda = 3820 - 5035\text{\AA}$ (спектральное разрешение $R \approx 4000$) и 1.8-метровый телескоп Коперник, который мы использовали для Эшелле спектров ($\lambda = 3470 - 7360\text{\AA}$, $R \approx 20000$).

Кадры CCD были обработаны с помощью хорошо зарекомендовавшего себя пакета IRAF. Плоские поля были последовательно получены для каждой наблюдательной сессии, а калибровочные спектры записывались с помощью стационарной лампы Fe/Ar перед каждым наблюдением каждого объекта.

Лучевые скорости были получены из наблюдательных данных с использованием Фурье метода кросс-корреляции из программного пакета IRAF. В качестве спектра сравнения мы использовали синтетические спектры. Сначала мы определили спектральный класс каждой звезды в соответствии с [124], затем выбрали атмосферные параметры для предполагаемых спектральных типов из [89], а затем в соответствии с выбранными параметрами мы выбрали синтетические спектры из [88]. Оценки спектральных типов исследованных звезд перечислены в Таблице 20.

3.5 Лучевые скорости и идентификация по двойным звезд по спектроскопическим данным

На рисунке 3.9 изображены диаграммы «цвет-звездная величина» скоплений и синим цветом обозначены звезды, для которых у нас есть спектроскопические измерения.

Результаты измерения лучевых скоростей представлены в Таблицах 21, 22 и 23 для FSR 866, NGC 1960 и Stock 2 соответственно и на рисунке 3.12.

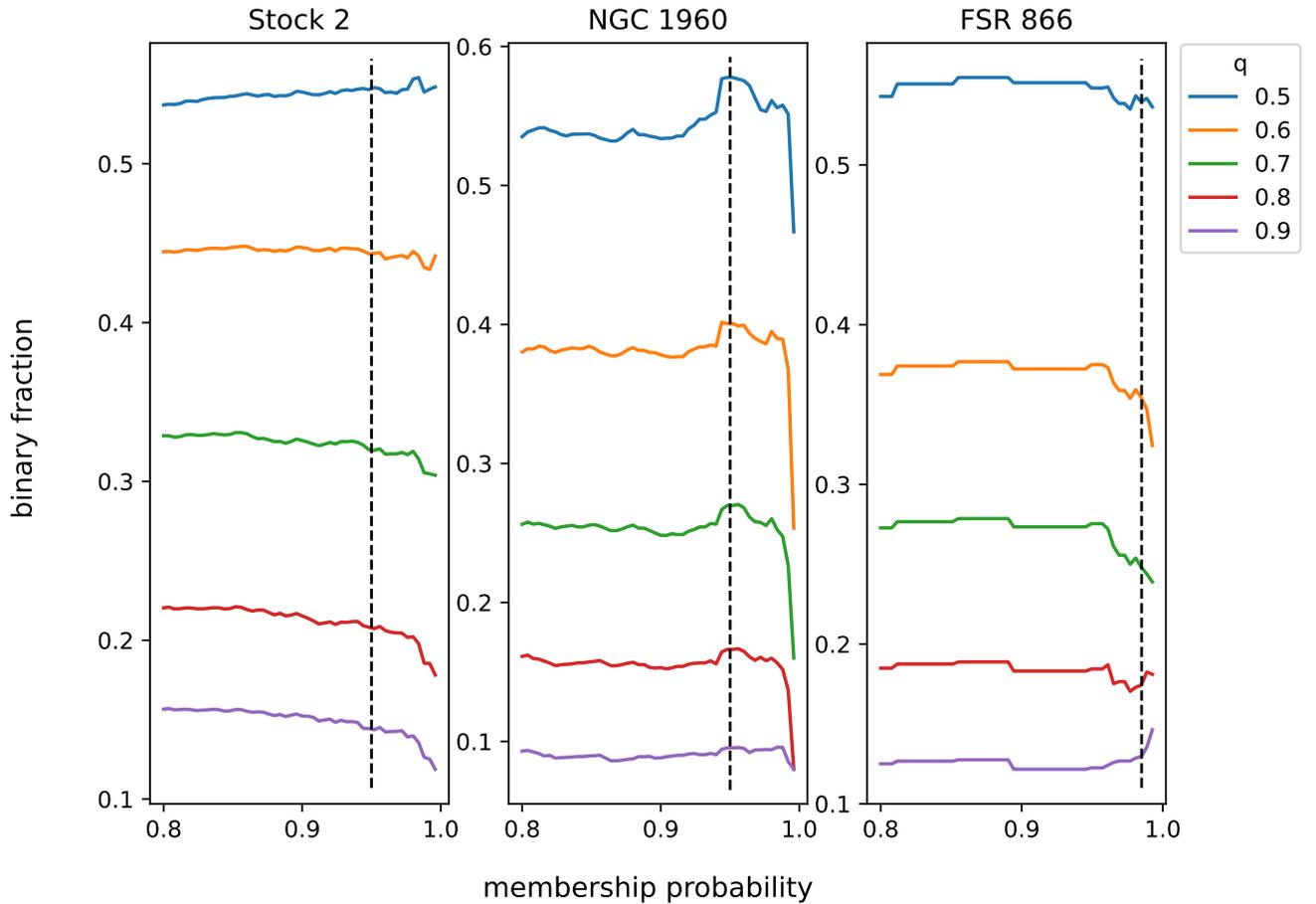


Рисунок 3.8 — Зависимость доли двойных звезд от выбора членов скопления для различных значений отношения масс \tilde{q} для рассеянных скоплений Stock 2, NGC 1960 и FSR 866. График охватывает диапазон пороговых значений вероятности членства звезды в скоплении от 0.8 до 1.0. Черная пунктирная линия показывает выбранный порог вероятности членства (0.95 для Stock 2 и NGC 1960, и 0.985 для FSR 866).

Для идентификации двойных звезд мы использовали следующие критерии ([125]):

- а) Если у звезды было более 3 наблюдений, мы использовали критерий хи-квадрат Пирсона с уровнем значимости 95%.
- б) Если у звезды было только 3 или менее наблюдений, мы рассчитали среднюю лучевую скорость (V_r) и стандартное отклонение (σV_r), а затем сравнили их со средней лучевой скоростью скопления ($V_{r,C1}$) и ее ошибкой ($\sigma V_{r,C1}$). Если V_r отличалась от $V_{r,C1}$ на $3 \times \sigma V_{r,C1}$ или $\sigma V_r > 3 \times \sigma V_{r,C1}$, звезда считалась кандидатом в двойные.

Средняя лучевая скорость скопления и ее ошибка были рассчитаны с использованием итеративного процесса. Мы использовали только те звезды,

которые были идентифицированы как одиночные. На первом шаге брались только звезды, отмеченные как одиночные по критерию (а). Затем были добавлены звезды, отмеченные как одиночные по критерию (b), и значения $V_{r,Cl}$ и $\sigma V_{r,Cl}$ были пересчитаны. Итеративный процесс повторялся до сходимости, когда не оставалось дополнительных одиночных звезд. Единственным исключением из этого алгоритма было скопление Stock 2, поскольку для этого скопления на первом шаге критерий (а) не дал ни одной одиночной звезды с более чем 3 наблюдениями для продолжения итерационного процесса. Это связано с высоким значением начальной оценки $\sigma V_{r,Cl}$, поэтому изначально ни одна звезда не отмечена как одиночная. Для Stock 2 мы использовали только критерий (b) для итеративного процесса, начиная нулевую итерацию со звездами, которые лежат в пределах только одного $\sigma V_{r,Cl}$ и продолжая итерации как обычно.

Итоговые значения средних лучевых скоростей скоплений и их погрешностей, рассчитанные на основе только одиночных звезд, следующие: 65.5 ± 1.0 км/с для FSR 866, -18.9 ± 1.4 км/с для NGC 1960 и -8.3 ± 0.5 км/с для Stock 2.

Следуя вышеописанным критериям, мы оценили статус двойственности звезд с измеренными лучевыми скоростями. Окончательный результат для каждой звезды с измеренной лучевой скоростью представлен в Таблицах 21, 22 и 23.

3.6 Сравнение лучевых скоростей с данными Gaia DR3

Мы сравнили полученные лучевые скорости с данными Gaia DR3 [18], см. Рис. 3.10. Данные по скоплениям FSR 866 и NGC 1960 показывают хорошее согласие. Расхождение в полученных результатах для скопления Stock 2, вероятно, может быть объяснено тем, что члены скопления, для которых были получены спектры, согласно проведенной нами спектральной классификации (Таблица 20), относятся к ранним типам А. В спектрах этих звезд доминируют линии водорода (серия Бальмера) и практически отсутствуют узкие линии, по которым бы можно было более надежно вычислить лучевую скорость, тогда как в спектрах В-звезд, к которым относится большинство изученных нами членов скопления NGC 1960, есть подходящие для этого линии гелия, магния и кремния. Можно заметить, что полученные нами данные для звезд s2, s3, s9 и s12 оказались близки к значению средней скорости скопления Stock 2, к

которому сходятся большинство авторов - около 8 км^{-1} . Эти звезды, в отличие от остальных изученных нами в этом скоплении звезд, принадлежат к поздним спектральным классам, т.е. их лучевая скорость определена более надежно.

На Рис. 3.11 представлено сравнение полученных нами лучевых скоростей для звезд скопления Stock 2 со скоростями из работы Хант и Рефферет [126]. В этой работе по данным Gaia DR3 были выделены вероятные члены скопления, а затем по тем из них, чья вероятность принадлежности к скоплению оказалась выше 50 %, были рассчитаны средние лучевые скорости скоплений. Как можно видеть, наши оценки скорости для звезд s2, s3 и s12 близки к значениям Gaia DR3 (звезды с индексом s9 не оказалось в списке звезд - членов скопления [126]).

Принимая во внимание возможную недостаточную точность полученных лучевых скоростей для звезд скопления Stock 2, мы приняли решение в дальнейшем исключить из рассмотрения вопрос об общей доли двойных звезд в этом скоплении на основе спектроскопических данных.

3.7 Доля двойных звезд по спектроскопическим данным

Чтобы оценить долю двойных звезд в скоплении, необходимо оценить потенциальную двойственность *каждой* звезды в некотором диапазоне звездных величин. Мы отсортировали звезды с измеренными лучевыми скоростями (и, следовательно, с оцененным двойственным статусом) в порядке убывания звездной величины и проверили, есть ли еще звезды – члены скопления (т.е. звезды с вероятностью членства выше выбранного порога) в этом диапазоне величин, у которых отсутствуют измеренные лучевые скорости и, следовательно, двойственный статус неизвестен. Результаты оценок доли двойных звезд следующие (см. Таблицу 24):

- *FSR 866*. 10 звезд с измеренными лучевыми скоростями, 4 из которых - кандидаты в двойные. Кроме того, в рассматриваемом диапазоне величин есть еще две звезды без измерений лучевых скоростей, поэтому они могут быть как двойными, так и одиночными. Учитывая их, доля двойных звезд для FSR 866 находится в диапазоне от $4/12$ (0.33) до $6/12$ (0.50), в среднем 0.42.

- *NGC 1960*. 14 звезд – членов скопления с измеренными лучевыми скоростями, 5 из которых предполагаются двойными. Кроме того, есть еще две звезды в исследуемом диапазоне величин без измерений лучевых скоростей, поэтому они могут быть как двойными, так и одиночными. Доля двойных звезд для *NGC 1960* находится в диапазоне от $5/16$ (0.31) до $7/16$ (0.44), в среднем 0.38.

3.8 Выводы

В данной части работы мы провели фотометрическое и спектроскопическое исследование трех рассеянных звездных скоплений - FSR 866, *NGC 1960* и *Stock 2* - с целью оценить долю двойных систем среди входящих в них звезд. Мы использовали фотометрию и спектроскопию *Gaia DR3* для предварительно отобранных ярких звезд-членов этих скоплений, проведенную нами в Астрофизической обсерватории Азиаго, Италия в 2019–2021 годах. Мы получили список вероятных членов скопления, применив метод кластеризации DBSCAN в трехмерном пространстве собственных движений и параллаксов, предварительно исследовав диапазон параметров алгоритма.

Для определения физических параметров скоплений (возраста и расстояния), мы сначала использовали 3D-карту пыли *Bayestar* [95], чтобы рассчитать индивидуальное покраснение для каждого члена скопления и сместить каждую звезду на диаграмме «цвет - звездная величина» в соответствии с этим значением. Средние избытки цветов оказались равными $E(B - V) = 0.34$ для *Stock 2*, $E(B - V) = 0.27$ для *NGC 1960* и $E(B - V) = 0.05$ для FSR 866. После этого мы наложили теоретические изохроны PARSEC + COLIBRI ([93]) на диаграмму «цвет-звездная величина» ($G, BP - RP$) с поправкой за покраснение и получили следующие оценки возраста и расстояния: $\log(\text{Age/yr}) = 8.50$ и расстояние = 463 пк для *Stock 2*, $\log(\text{Age/yr}) = 7.48$ и расстояние = 1202 пк для *NGC 1960* и $\log(\text{Age/yr}) = 9.57$ и расстояние = 1330 пк для FSR 866.

Мы использовали два разных метода оценки доли двойных звезд: фотометрический и спектроскопический. Изучая спектры звезд-членов скопления, мы также вывели их спектральную классификацию, которая приведена в Таблице 20.

Используя фотометрические данные звезд - членов скоплений, мы следовали подходу, описанному в работах [120], [121] и [122]). На диаграмме «цвет-звездная величина» каждого скопления исследовались области, границы которых задаются определенным диапазоном звездных величин, положением главной последовательности и погрешностями цвета членов скопления (подробнее см. раздел 3.3). Полученные значения доли двойных звезд для трех скоплений для разных пороговых параметров отношения масс \tilde{q} приведены в Таблице 19 и для случая $\tilde{q} = 0.6$ составляют: 0.35 для FSR 866, 0.4 для NGC 1960 и 0.44 для Stock 2. Все значения находятся в типичном диапазоне, найденном разными авторами для ранее исследованных рассеянных звездных скоплений.

Что касается спектроскопии, то мы использовали лучевые скорости членов скопления, полученные нами по собственным спектроскопическим наблюдениям (см. Таблицы 23, 22 и 21). Итоговые значения средних лучевых скоростей скоплений и их ошибки, рассчитанные только по одиночным звездам, таковы: 65.5 ± 1.0 км с⁻¹ для FSR 866, -18.9 ± 1.4 км с⁻¹ для NGC 1960 и -8.3 ± 0.5 км с⁻¹ для Stock 2. К последнему значению следует относиться с осторожностью, так как вероятно полученные результаты для скопления Stock 2 могут быть не точны. Итоговые значения доли двойных звезд следующие (см. Таблицу 24): для FSR 866 она лежит в пределах 4/12 (0.33) - 6/12 (0.50), а для NGC 1960 5/16 (0.31) - 7/16 (0.44). Опять же, все диапазоны в целом вполне типичны для РЗС.

Два подхода к оценке доли двойных систем дополняют друг друга: метод фотометрии дает представление о более слабой части главной последовательности, а лучевые скорости, в основном, позволяют исследовать более массивные и яркие члены скопления. Конечно, оба подхода имеют свои ограничения в определении двойных систем звезд. Основными ограничениями являются неопределенность из-за ошибок фотометрии и зависимости от порогового параметра \tilde{q} для фотометрического подхода, а также необходимость большого количества повторных наблюдений для метода с использованием спектроскопии. Как уже упоминалось, доля двойных звезд зависит от многих факторов, таких как возраст, масса и концентрация звезд скопления. Три исследованных скопления различаются по всем этим параметрам, что затрудняет их сравнение. Поскольку подход фотометрии учитывает больше звезд, его можно считать в большей степени отражающим среднее количество двойных систем в скоплении. Тогда можно заметить, что FSR 866, являющееся самым старым из трех

скоплений, имеет самую низкую долю двойных звезд согласно фотометрическому подходу, в то время как доли двойных в двух более молодых скоплениях, NGC 1960 и Stock 2, существенно не различаются.

Таблица 20 — Список звезд – членов исследуемых РЗС с указанием спектральных классов.

Звезда	Спектральный класс	Звезда	Спектральный класс
FSR 866			
s1	K2 III	s8	K0 V
s2	K0 III	s10	K0 V
s3	K0 III	s11	A7 - F0
s5	K0 III	s12	F8
s6	F2	s22	G0
s7	F5	s32	K0
NGC 1960			
s4	B3	s12	B5
s5	B1	s13	B7
s6	B3	s14	B5
s7	B1e ₃	s15	B8
s8	B1 V	s17	B7 - B8
s9	B5e ₂	s18	B6
s11	B3	s19	B7
Stock 2			
s2	G8 III	s26	A1
s3	G8 III - K0 III	s27	A0
s7	A1	s28	A1
s8	A2	s31	A2
s9	G8 III	s32	A2
s10	A2	s33	A1
s11	A1	s36	A2
s12	G8 III	s41	A2
s13	A1	s42	A1
s15	A1	s43	A1
s16	A1 - A2	s44	A1
s17	A1	s45	A1
s18	A2	s46	A2
s19	A1	s47	A4
s21	A0	s49	A3
s22	A2	s50	A2
s23	A1	s51	A2
s24	A2	s68	A3
s25	A2		

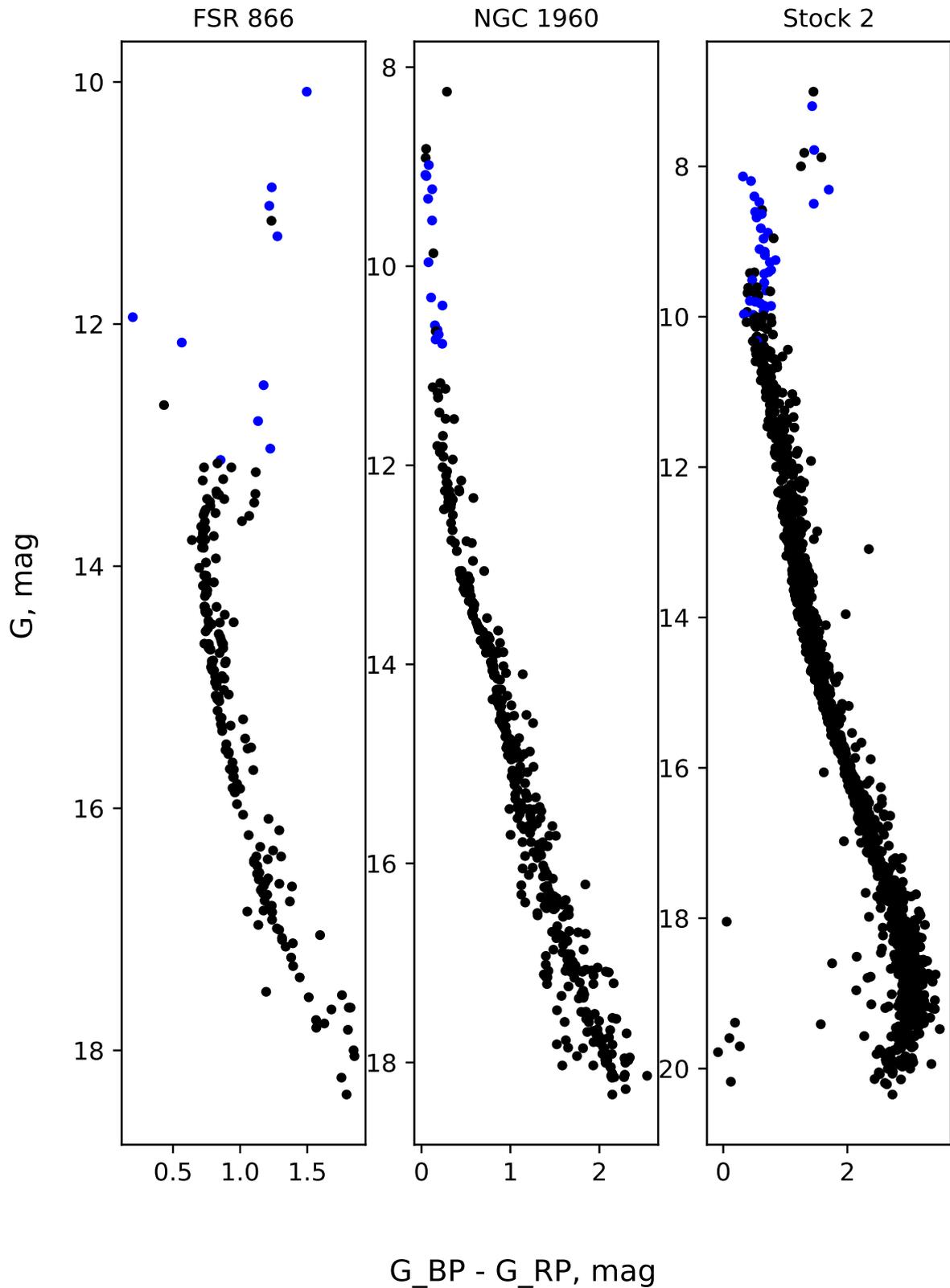


Рисунок 3.9 — Диаграмма цвет-величина для рассеянных скоплений Stock 2, NGC 1960 и FSR 866, показаны только звезды с вероятностью членства $P > 0.95$ для Stock 2, NGC 1960 и $P > 0.985$ для FSR 866; звезды, для которых есть спектроскопические измерения, обозначены синим цветом.

Таблица 21 — Список звезд с измеренными лучевыми скоростями для FSR 866, звезды расположены в порядке убывания по яркости G_{mag} (см. раздел 3.1). N_{obs} - количество наблюдений, V_r - средняя лучевая скорость, σV_r - ее ошибка, двойственность - статус двойственности на основе критериев (а) и (б), как описано в разд. 3.5.

Звезда	N_{obs}	V_r	σV_r	Двойственность
s1	5	63.267	0.872	одионочная
s2	5	66.622	1.821	одионочная
s3	4	63.767	2.113	одионочная
s5	4	61.413	9.542	двойная
s6	2	64.189	0.267	одионочная
s7	1	12.509	0.0	двойная
s8	1	74.019	0.0	двойная
s10	1	66.204	0.0	одионочная
s11	1	71.406	0.0	двойная
s12	1	69.224	0.0	одионочная

Таблица 22 — То же, что и Таблица 21, но для NGC 1960.

Звезда	N_{obs}	V_r	σV_r	Двойственность
s4	3	-14.389	12.497	одионочная
s5	3	-27.911	20.634	двойная
s6	4	-16.782	7.976	двойная
s7	4	-21.469	11.583	двойная
s8	5	-15.867	59.392	двойная
s9	4	-30.987	7.378	двойная
s11	3	-13.194	5.808	одионочная
s12	3	-22.391	3.72	одионочная
s13	2	-18.548	3.791	одионочная
s14	2	-14.833	0.863	одионочная
s15	2	-24.959	8.597	одионочная
s17	2	-19.387	8.172	одионочная
s18	2	-22.659	1.808	одионочная
s19	2	-19.527	1.882	одионочная

Таблица 23 — То же, что и Таблица 21, но для Stock 2.

Звезда	N_{obs}	V_r	σV_r	Двойственность
s2	3	6.884	3.399	двойная
s3	3	2.334	8.243	двойная
s7	4	-6.204	5.945	двойная
s8	2	-4.824	7.904	одиночная
s9	3	-0.087	8.605	двойная
s10	1	-9.101	0.0	одиночная
s11	2	-10.178	0.708	одиночная
s12	3	5.192	3.545	двойная
s13	2	-6.646	0.427	одиночная
s15	2	-9.159	2.117	одиночная
s16	1	-10.956	0.0	одиночная
s17	2	-11.782	2.249	одиночная
s18	1	-9.451	0.0	одиночная
s19	3	-7.854	1.52	одиночная
s21	2	-4.9	2.268	одиночная
s22	2	-10.032	1.923	одиночная
s23	1	-7.616	0.0	одиночная
s24	2	-11.311	3.675	одиночная
s25	2	-12.433	5.918	одиночная
s26	2	-13.781	1.291	одиночная
s27	1	-18.762	0.0	двойная
s28	1	-8.907	0.0	одиночная
s31	1	-7.224	0.0	одиночная
s32	1	-6.845	0.0	одиночная
s33	1	-8.574	0.0	одиночная
s36	1	-3.056	0.0	одиночная
s41	1	-5.835	0.0	одиночная
s42	1	-15.563	0.0	двойная
s43	1	-4.179	0.0	одиночная
s44	1	-17.376	0.0	двойная
s45	1	-10.615	0.0	одиночная
s46	1	-4.9	0.0	одиночная
s47	1	-9.19	0.0	одиночная
s49	1	-15.446	0.0	двойная
s50	1	-14.704	0.0	двойная
s68	1	-20.665	0.0	двойная

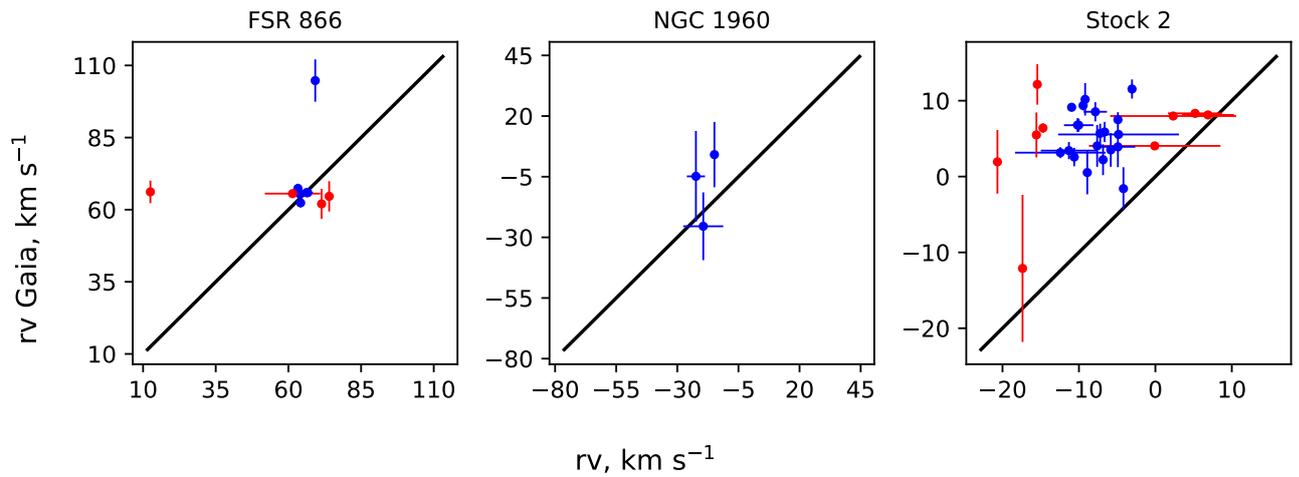


Рисунок 3.10 — Сравнение полученных в данной работе лучевых скоростей с данными Gaia DR3 [18]. Синим цветом обозначены одиночные звезды, а двойные – красным. Черной линией проведена диагональ.

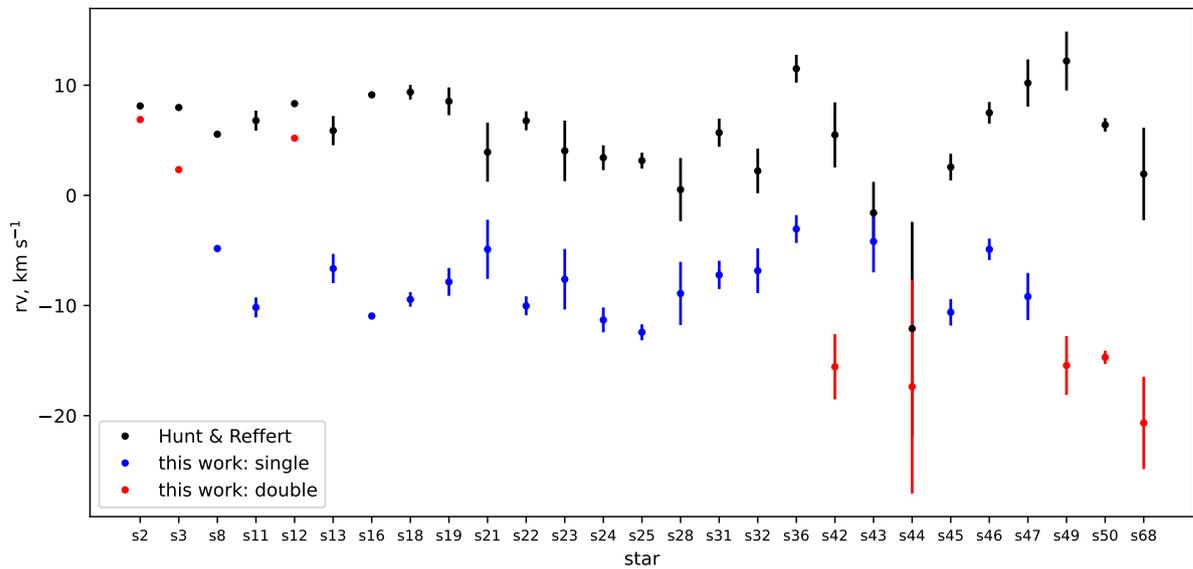


Рисунок 3.11 — Сравнение полученных нами лучевых скоростей с результатами из работы [126], опирающейся на данные Gaia DR3 [18]. Черным цветом обозначены значения из [126]. Синим цветом обозначены звезды, которые по описанной выше методике были признаны нами одиночными, а красным - двойные.

Таблица 24 — Доля двойных звезд, полученные по лучевым скоростям (RV) (раздел 3.5), в сравнении с оценкой долей двойных, полученных с помощью фотометрии (раздел 3.3) для случая $\tilde{q} = 0.6$.

Скопление	Доля двойных (RV)	Среднее значение (RV)	Доля двойных ($\tilde{q} = 0.6$)
FSR 866	0.33 – 0.50	0.42	0.35
NGC 1960	0.31 – 0.44	0.38	0.4
Stock 2	-	-	0.44

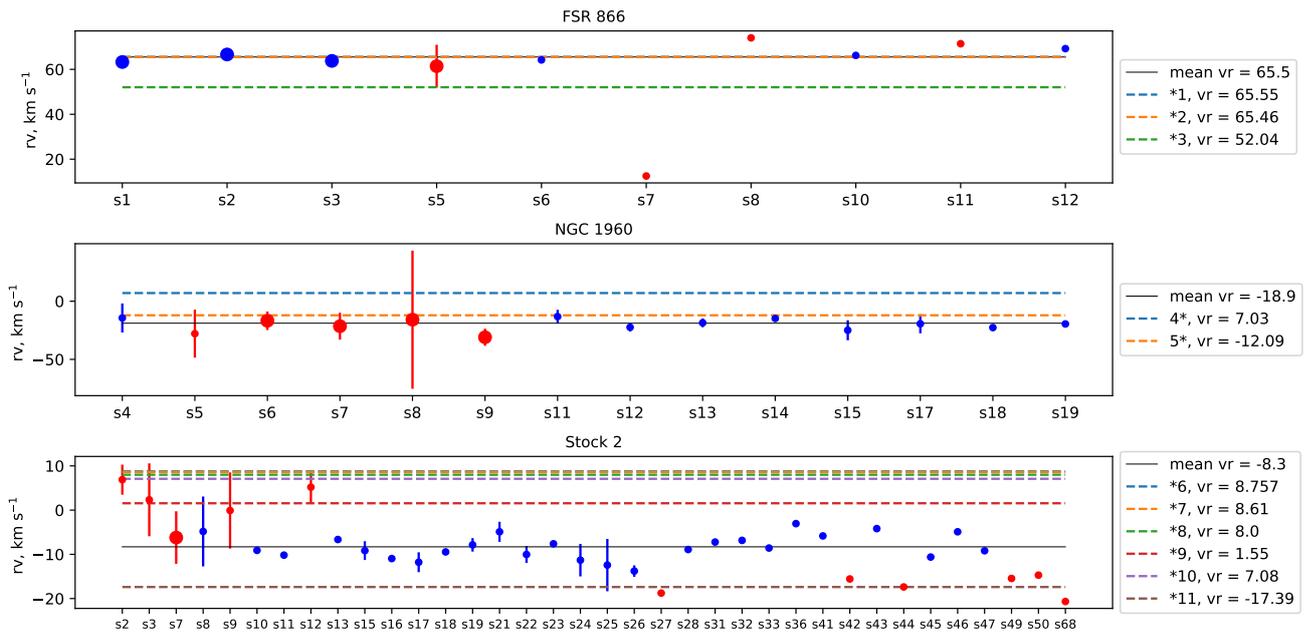


Рисунок 3.12 — Измерения лучевых скоростей скоплений. Одиночные звезды изображены синим цветом, а двойные — красным. Большими кружками отмечены звезды с более чем 3 наблюдениями. Черная линия — средняя лучевая скорость, остальные линии демонстрируют оценки из литературы, упомянутые в Таблице 15, где *1 - [57], *2 - [17], *3 - [106], 4* - [17], 5* - [106], *6 - [57], *7 - [17], *8 - [115], *9 - [106], *10 - [117], *11 - [118]

Заключение

В данной работе мы использовали методы кластерного анализа, полученные нами фотометрические и спектроскопические данные, а также данные из открытых источников, важнейшими из которых являются релизы проекта Gaia, для исследования области звездообразования Sco OB1 в окрестностях рассеянного звездного скопления Trumpler 24 и четырех рассеянных звездных скоплений - NGC 225, FSR 866, NGC 1960 и Stock 2.

При изучении таких объектов, как звездные скопления, исследователь на одном из первых этапов неизменно сталкивается с необходимостью отбора звезд, которые, как он считает, вероятнее всего принадлежат к скоплениям и данные о которых помогут наиболее точно описать их. Если существующих данных недостаточно, формируются списки для наблюдений, в которые также целесообразно включить как можно меньше звезд фона, не имеющих отношения к изучаемому скоплению. Улучшение и развитие методов определения принадлежности звезд к скоплениям или другим структурам важно и определяет, данные каких объектов попадут в выборку исследования и насколько точны будут конечные результаты, они закладывают основы работы. Эти методы могут быть применены и к другим объектам, которые можно представить как состоящие из элементов, имеющих общие свойства, например области звездообразования, шаровые скопления, звездные ассоциации, звездные потоки, возникающие при разрушении скоплений. Предложенные в работе способы применения современных методов кластеризации, использованные для присвоения вероятности членства звезд к скоплениям NGC 225, FSR 866, NGC 1960 и Stock 2, также могут быть адаптированы для исследования подобных объектов.

Другим преимуществом алгоритмов кластерного анализа является обнаружение ранее неизвестных структур в многомерном пространстве параметров, что было продемонстрировано на примере выявления различных групп в области звездообразования Sco OB1. Было показано, что область звездообразования имеет сложную структуру, которую, однако, можно разделить на генетически связанные группы. В случае исследованной в работе области вблизи скопления Trumpler 24 выделено семь таких групп, которые в свою очередь можно объединить в две подгруппы: молодое звездное население, связанное с ассоциацией, и более старое население, не связанное с ней. Мы подтвердили, что одна

из групп совпадает со считавшимся ранее ненадежно детектированным скоплением VdB-Hagen 202 и является физическим объектом. Аналогичным образом можно исследовать и другие области, что позволит сделать выводы об их этапах звездообразования.

Другой интересной задачей, которая была решена в данной работе, является оценка доли двойных звезд для скоплений NGC 225, FSR 866, NGC 1960 и Stock 2 – характеристики, известной для очень малого числа скоплений и для данных скоплений найденной впервые. Для NGC 225 было показано, как наличие двойных звезд влияет на оценки массы скопления. Подобный анализ может быть сделан и для других скоплений, для которых известна доля двойных звезд в составе. Учет двойных звезд также важен для понимания процессов, происходящих в ходе эволюции скоплений, и полученные результаты могут быть использованы для моделирования и более детального взгляда на начальные характеристики скоплений. Очень перспективным выглядит использование третьего и последующих релизов каталога Gaia для нахождения доли двойных звезд среди членов рассеянных скоплений и вычисления их массы. В ходе решения данной задачи также были разрешены встречающиеся в литературе разногласия касательно физических характеристик упомянутых скоплений (возраст, расстояние, средние лучевые скорости).

Следует отметить, что в ходе данной работы был получен большой массив спектральных наблюдений для звезд с высокой вероятностью являющихся членами скоплений NGC 225, FSR 866, NGC 1960 и Stock 2, который в дальнейшем может быть использован для изучения химического состава этих звезд и характеристики средней металличности данных скоплений в целом.

Благодарности

Хочется выразить огромную благодарность своему научному руководителю, Глушковой Елене Вячеславовне, за ценные замечания, помощь и поддержку. Благодарю Джованни Карраро за предоставленную возможность наблюдений на телескопе обсерватории Азиаго (Италия), многолетнее сотрудничество и помощь. Также хочется поблагодарить Дамбиса Андрея Карловича и Расторгуева Алексея Сергеевича за плодотворные обсуждения и ценные советы. Спасибо моей семье и моему прекрасному мужу и соавтору, Чемелю Александру.

Список литературы

1. *Carrera R.* [и др.]. OCCASO. IV. Radial velocities and open cluster kinematics // *Astronomy and Astrophysics*. — 2022. — Февр. — Т. 658. — A14. — arXiv: [2110.02110](#) [[astro-ph.SR](#)].
2. *Cantat-Gaudin T.* [и др.]. A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Окт. — Т. 618. — A93. — arXiv: [1805.08726](#) [[astro-ph.GA](#)].
3. *Star Clusters: Basic Galactic Building Blocks Throughout Time and Space*. Т. 261 / под ред. R. de Grijs, J. R. D. Lépine. — 02.2010.
4. *Buckner A. S. M., Froebrich D.* Properties of star clusters - I. Automatic distance and extinction estimates // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Дек. — Т. 436, № 2. — С. 1465—1478. — arXiv: [1309.0708](#) [[astro-ph.GA](#)].
5. *Martinez-Medina L. A., Pichardo B., Moreno E., Peimbert A., Velazquez H.* On the Origin of High-altitude Open Clusters in the Milky Way // *Astrophysical Journal, Letters*. — 2016. — Янв. — Т. 817, № 1. — С. L3. — arXiv: [1601.02612](#) [[astro-ph.GA](#)].
6. *Quillen A. C., Nolting E., Minchev I., De Silva G., Chiappini C.* Migration in the shearing sheet and estimates for young open cluster migration // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Апр. — Т. 475, № 4. — С. 4450—4466. — arXiv: [1709.04801](#) [[astro-ph.GA](#)].
7. *Netopil M., Paunzen E., Heiter U., Soubiran C.* On the metallicity of open clusters. III. Homogenised sample // *Astronomy and Astrophysics*. — 2016. — Янв. — Т. 585. — A150. — arXiv: [1511.08884](#) [[astro-ph.SR](#)].
8. *Casamiquela L.* [и др.]. OCCASO - II. Physical parameters and Fe abundances of red clump stars in 18 open clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Окт. — Т. 470, № 4. — С. 4363—4381. — arXiv: [1706.03656](#) [[astro-ph.GA](#)].

9. *Donor J.* [и др.]. The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. II. Precision Cluster Abundances for APOGEE Using SDSS DR14 // *Astronomical Journal*. — 2018. — Окт. — Т. 156, № 4. — С. 142. — arXiv: [1807.09791 \[astro-ph.GA\]](#).
10. *Donor J.* [и др.]. The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. IV. Abundances for 128 Open Clusters Using SDSS/APOGEE DR16 // *Astronomical Journal*. — 2020. — Июнь. — Т. 159, № 5. — С. 199. — arXiv: [2002.08980 \[astro-ph.GA\]](#).
11. *Spina L.* [и др.]. The GALAH survey: tracing the Galactic disc with open clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — Май. — Т. 503, № 3. — С. 3279–3296. — arXiv: [2011.02533 \[astro-ph.GA\]](#).
12. *Cantat-Gaudin T.* Milky Way Star Clusters and Gaia: A Review of the Ongoing Revolution // *Universe*. — 2022. — Февр. — Т. 8, № 2. — С. 111.
13. *Lada C. J., Lada E. A.* Embedded Clusters in Molecular Clouds // *Annual Review of Astron and Astrophysics*. — 2003. — Янв. — Т. 41. — С. 57–115. — arXiv: [astro-ph/0301540 \[astro-ph\]](#).
14. *Gaia Collaboration* [и др.]. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Авг. — Т. 616. — A1. — arXiv: [1804.09365 \[astro-ph.GA\]](#).
15. *Gaia Collaboration* [и др.]. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Май. — Т. 649. — A1. — arXiv: [2012.01533 \[astro-ph.GA\]](#).
16. *Soubiran C.* [и др.]. Open cluster kinematics with Gaia DR2 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Ноябрь. — Т. 619. — A155. — arXiv: [1808.01613 \[astro-ph.SR\]](#).
17. *Tarricq Y.* [и др.]. 3D kinematics and age distribution of the open cluster population // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Март. — Т. 647. — A19. — arXiv: [2012.04017 \[astro-ph.GA\]](#).
18. *Gaia Collaboration* [и др.]. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. — 2023. — Июнь. — Т. 674. — A1. — arXiv: [2208.00211 \[astro-ph.GA\]](#).

19. *Oh S., Kroupa P.* Very massive stars in not so massive clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Ноябрь. — Т. 481, № 1. — С. 153–163. — arXiv: [1809.04596 \[astro-ph.GA\]](#).
20. *Oh S., Kroupa P., Banerjee S.* R144: a very massive binary likely ejected from R136 through a binary-binary encounter // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Февр. — Т. 437, № 4. — С. 4000–4005. — arXiv: [1311.2934 \[astro-ph.GA\]](#).
21. *Oh S., Kroupa P.* Dynamical ejections of massive stars from young star clusters under diverse initial conditions // Astronomy and Astrophysics. — 2016. — Май. — Т. 590. — A107. — arXiv: [1604.00006 \[astro-ph.GA\]](#).
22. *Sheikhi N.* [и др.]. The binary fraction and mass segregation in Alpha Persei open cluster // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2016. — Март. — Т. 457, № 1. — С. 1028–1036. — arXiv: [1601.02186 \[astro-ph.GA\]](#).
23. *Yalyalieva L.* [и др.]. A new look at Sco OB1 association with Gaia DR2 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Июнь. — Т. 495, № 1. — С. 1349–1359. — arXiv: [2004.13418 \[astro-ph.GA\]](#).
24. *Yalyalieva L., Carraro G., Glushkova E., Munari U., Ochner P.* The young Galactic cluster NGC 225: binary stars' content and total mass estimate // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Июль. — Т. 513, № 4. — С. 5299–5309. — arXiv: [2204.12558 \[astro-ph.GA\]](#).
25. *Yalyalieva L. N., Glushkova E. V., Carraro G., Ikonnikova N. P., Gasyrov D.* Photometric Study of the Open Cluster NGC 225 // Astrophysical Bulletin. — 2022. — Март. — Т. 77, № 1. — С. 78–83.
26. *Yalyalieva L., Chemel A., Carraro G., Glushkova E.* Binary fraction in Galactic star clusters: FSR 866, NGC 1960, and STOCK 2 // The Astronomical Journal. — 2024. — Февр. — Т. 167, № 3. — С. 100.
27. *Lada C. J., Lada E. A.* Embedded Clusters in Molecular Clouds // Annual Review of Astron and Astrophysics. — 2003. — Янв. — Т. 41. — С. 57–115. — arXiv: [astro-ph/0301540 \[astro-ph\]](#).
28. *Ward J. L., Kruijssen J. M. D., Rix H.-W.* Not all stars form in clusters - Gaia-DR2 uncovers the origin of OB associations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Июнь. — Т. 495, № 1. — С. 663–685. — arXiv: [1910.06974 \[astro-ph.SR\]](#).

29. *Mel'nik A. M., Dambis A. K.* Kinematics of OB Associations and the First Data from the Gaia Satellite // *Astronomy Reports*. — 2018. — Дек. — Т. 62, № 12. — С. 998—1002.
30. *Efremov Y. N.* Open Clusters Associations and Stellar Complexes // *Astrophysics and Space Science Review*. — 1989. — ЯНВ. — Т. 7. — С. 107.
31. *Gouliermis D. A.* Unbound Young Stellar Systems: Star Formation on the Loose // *Publications of the ASP*. — 2018. — ИЮЛЬ. — Т. 130, № 989. — С. 072001. — arXiv: [1806.11541](https://arxiv.org/abs/1806.11541) [[astro-ph.GA](#)].
32. *Beccari G.* [и др.]. A sextet of clusters in the Vela OB2 region revealed by Gaia // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Ноябрь. — Т. 481, № 1. — С. L11—L15. — arXiv: [1807.07073](https://arxiv.org/abs/1807.07073) [[astro-ph.SR](#)].
33. *Damiani F.* The low-mass pre-main sequence population of Scorpius OB1 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — ИЮЛЬ. — Т. 615. — A148. — arXiv: [1804.01905](https://arxiv.org/abs/1804.01905) [[astro-ph.SR](#)].
34. *Baume G., Vázquez R. A., Feinstein A.* UBVI imaging photometry of NGC 6231 // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 1999. — ИЮНЬ. — Т. 137. — С. 233—244.
35. *Feinstein C., Martínez R., Vergne M. M., Baume G., Vázquez R.* Optical Polarization Observations of NGC 6231: Evidence for a Past Supernova Fingerprint // *Astrophysical Journal*. — 2003. — Ноябрь. — Т. 598, № 1. — С. 349—356. — arXiv: [astro-ph/0311133](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311133) [[astro-ph](#)].
36. *Sung H., Bessell M. S., Lee S.-W.* UBVRI and H α Photometry of the Young Open Cluster NGC 6231 // *Astronomical Journal*. — 1998. — ФЕВР. — Т. 115, № 2. — С. 734—744.
37. *Sung H., Sana H., Bessell M. S.* The Initial Mass Function and the Surface Density Profile of NGC 6231 // *Astronomical Journal*. — 2013. — ФЕВР. — Т. 145, № 2. — С. 37. — arXiv: [1211.4278](https://arxiv.org/abs/1211.4278) [[astro-ph.SR](#)].
38. *Heske A., Wendker H. J.* UBV photometry of TR 24 and its relation to SCO OB1. // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 1984. — АВГ. — Т. 57. — С. 205—212.
39. *Krone-Martins A., Moitinho A.* UPMASK: unsupervised photometric membership assignment in stellar clusters // *Astronomy and Astrophysics*. — 2014. — ЯНВ. — Т. 561. — A57. — arXiv: [1309.4471](https://arxiv.org/abs/1309.4471) [[astro-ph.IM](#)].

40. *Tang S.-Y.* [и др.]. Discovery of Tidal Tails in Disrupting Open Clusters: Coma Berenices and a Neighbor Stellar Group // *Astrophysical Journal*. — 2019. — Май. — Т. 877, № 1. — С. 12. — arXiv: [1902.01404 \[astro-ph.GA\]](#).
41. *Yuan Z.* [и др.]. StarGO: A New Method to Identify the Galactic Origins of Halo Stars // *Astrophysical Journal*. — 2018. — Август. — Т. 863, № 1. — С. 26. — arXiv: [1806.06341 \[astro-ph.GA\]](#).
42. *Cantat-Gaudin T.* [и др.]. Expanding associations in the Vela-Puppis region. 3D structure and kinematics of the young population // *Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — Июнь. — Т. 626. — A17. — arXiv: [1812.08114 \[astro-ph.GA\]](#).
43. *Landolt A. U.* UBVRI Photometric Standard Stars Around the Celestial Equator: Updates and Additions // *Astronomical Journal*. — 2009. — Май. — Т. 137, № 5. — С. 4186—4269. — arXiv: [0904.0638 \[astro-ph.SR\]](#).
44. *Hamuy M.* [и др.]. The Carnegie Supernova Project: The Low-Redshift Survey // *Publications of the ASP*. — 2006. — Янв. — Т. 118, № 839. — С. 2—20. — arXiv: [astro-ph/0512039 \[astro-ph\]](#).
45. *Stetson P. B.* DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry // *Publications of the ASP*. — 1987. — Март. — Т. 99. — С. 191.
46. *Heske A., Wendker H. J.* Further photometry and spectroscopy in the young cluster region Tr24/Sco OB1. // *Astronomy and Astrophysics*. — 1985. — Октябрь. — Т. 151. — С. 309—314.
47. *Marigo P.* [и др.]. A New Generation of PARSEC-COLIBRI Stellar Isochrones Including the TP-AGB Phase // *Astrophysical Journal*. — 2017. — Янв. — Т. 835, № 1. — С. 77. — arXiv: [1701.08510 \[astro-ph.SR\]](#).
48. *Pedregosa F.* [и др.]. Scikit-learn: Machine Learning in Python // *Journal of Machine Learning Research*. — 2011. — Т. 12. — С. 2825—2830.
49. *Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H., Xu X.* DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN // *ACM Transactions on Database Systems*. — 2017. — Июль. — Т. 42. — С. 1—21.
50. *Kuhn M. A., Hillenbrand L. A., Sills A., Feigelson E. D., Getman K. V.* Kinematics in Young Star Clusters and Associations with Gaia DR2 // *Astrophysical Journal*. — 2019. — Янв. — Т. 870, № 1. — С. 32. — arXiv: [1807.02115 \[astro-ph.GA\]](#).

51. *Turner D. G.* Color-Magnitude Diagrams for Young Open Clusters // The Origins, Evolution, and Destinies of Binary Stars in Clusters. Т. 90 / под ред. E. F. Milone, J. -. Mermilliod. — 01.1996. — С. 443. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
52. *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction // *Astrophysical Journal*. — 1989. — Окт. — Т. 345. — С. 245.
53. *Carraro G.* Photometric distances to young stars in the inner Galactic disk. I. The $L = 314^\circ$ direction // *Astronomy and Astrophysics*. — 2011. — Дек. — Т. 536. — A101. — arXiv: [1111.0579](https://arxiv.org/abs/1111.0579) [[astro-ph.GA](#)].
54. *Lindgren L.* [и др.]. Gaia Data Release 2. The astrometric solution // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Авг. — Т. 616. — A2. — arXiv: [1804.09366](https://arxiv.org/abs/1804.09366) [[astro-ph.IM](#)].
55. *Zinn J. C., Pinsonneault M. H., Huber D., Stello D.* Confirmation of the Gaia DR2 Parallax Zero-point Offset Using Asteroseismology and Spectroscopy in the Kepler Field // *Astrophysical Journal*. — 2019. — ИЮНЬ. — Т. 878, № 2. — С. 136. — arXiv: [1805.02650](https://arxiv.org/abs/1805.02650) [[astro-ph.SR](#)].
56. *Riess A. G.* [и др.]. Milky Way Cepheid Standards for Measuring Cosmic Distances and Application to Gaia DR2: Implications for the Hubble Constant // *Astrophysical Journal*. — 2018. — ИЮЛЬ. — Т. 861, № 2. — С. 126. — arXiv: [1804.10655](https://arxiv.org/abs/1804.10655) [[astro-ph.CO](#)].
57. *Dias W. S., Alessi B. S., Moitinho A., Lépine J. R. D.* New catalogue of optically visible open clusters and candidates // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — ИЮЛЬ. — Т. 389. — С. 871—873. — arXiv: [astro-ph/0203351](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0203351) [[astro-ph](#)].
58. *van den Bergh S., Hagen G. L.* Uniform survey of clusters in the southern Milky Way. // *Astronomical Journal*. — 1975. — ЯНВ. — Т. 80. — С. 11—16.
59. *Seggewiss W.* Dreifarben-Photometrie der südlichen Sternhaufen NGC 6242, NGC 6268 und Tr 24 // *Zeitschrift fuer Astrophysik*. — 1968. — ЯНВ. — Т. 68. — С. 142.
60. *Eggen O. J.* Is Star Formation Bimodal? The Early Main Sequence // *Quarterly journal of the Royal Astronomical Society*. — 1976. — Дек. — Т. 17. — С. 472.

61. *Koenig X. P.* [и др.]. Wide-field Infrared Survey Explorer Observations of the Evolution of Massive Star-forming Regions // *Astrophysical Journal*. — 2012. — ЯНВ. — Т. 744, № 2. — С. 130.
62. *Cutri R. M., et al.* VizieR Online Data Catalog: WISE All-Sky Data Release (Cutri+ 2012) // *VizieR Online Data Catalog*. — 2012. — Апр. — С. II/311.
63. *Borodina O. I., Seleznev A. F., Carraro G., Danilov V. M.* Unresolved Binaries and Galactic Clusters' Mass Estimates // *Astrophysical Journal*. — 2019. — Апр. — Т. 874, № 2. — С. 127. — arXiv: [1902.10443](https://arxiv.org/abs/1902.10443) [[astro-ph.SR](#)].
64. *Kroupa P.* Inverse dynamical population synthesis and star formation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1995. — Дек. — Т. 277. — С. 1491. — arXiv: [astro-ph/9508117](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9508117) [[astro-ph](#)].
65. *Kroupa P.* The dynamical properties of stellar systems in the Galactic disc // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1995. — Дек. — Т. 277. — С. 1507. — arXiv: [astro-ph/9508084](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9508084) [[astro-ph](#)].
66. *Kroupa P.* Star cluster evolution, dynamical age estimation and the kinematical signature of star formation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1995. — Дек. — Т. 277. — С. 1522. — arXiv: [astro-ph/9507017](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9507017) [[astro-ph](#)].
67. *Marks M., Kroupa P., Oh S.* An analytical description of the evolution of binary orbital-parameter distributions in N-body computations of star clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — Нояб. — Т. 417, № 3. — С. 1684–1701. — arXiv: [1106.5050](https://arxiv.org/abs/1106.5050) [[astro-ph.GA](#)].
68. *Niu H., Wang J., Fu J.* Binary Fraction Estimation of Main-sequence Stars in 12 Open Clusters: Based on the Homogeneous Data of LAMOST Survey and Gaia DR2 // *Astrophysical Journal*. — 2020. — Нояб. — Т. 903, № 2. — С. 93.
69. *Sollima A.* [и др.]. The fraction of binary systems in the core of five Galactic open clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — ЯНВ. — Т. 401, № 1. — С. 577–585. — arXiv: [0909.1277](https://arxiv.org/abs/0909.1277) [[astro-ph.SR](#)].

70. *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. — Окт. — Т. 434, № 4. — С. 3236—3245. — arXiv: [1307.2020 \[astro-ph.GA\]](#).
71. *Geller A. M.* [и др.]. Stellar Radial Velocities in the Old Open Cluster M67 (NGC 2682). II. The Spectroscopic Binary Population // Astronomical Journal. — 2021. — Апр. — Т. 161, № 4. — С. 190. — arXiv: [2101.07883 \[astro-ph.SR\]](#).
72. *Banyard G.* [и др.]. The observed multiplicity properties of B-type stars in the Galactic young open cluster NGC 6231 // Astronomy and Astrophysics. — 2022. — Февр. — Т. 658. — A69. — arXiv: [2108.07814 \[astro-ph.SR\]](#).
73. *Bilir S.* [и др.]. CCD UBV photometry and kinematics of the open cluster NGC 225 // Advances in Space Research. — 2016. — Нояб. — Т. 58, № 9. — С. 1900—1914. — arXiv: [1606.08608 \[astro-ph.GA\]](#).
74. *Lattanzi M. G., Massone G., Munari U.* Membership and CM Diagram of Young Open Clusters. I. NGC 225 // Astronomical Journal. — 1991. — Июль. — Т. 102. — С. 177.
75. *Subramaniam A., Mathew B., Kartha S. S.* Star formation in the region of young open cluster - NGC 225 // Bulletin of the Astronomical Society of India. — 2006. — Дек. — Т. 34, № 4. — С. 315.
76. *Svolopoulos S. N.* Spectral Classification in Nine Open Clusters. // Astrophysical Journal. — 1962. — Нояб. — Т. 136. — С. 788.
77. *Conrad C.* [и др.]. A RAVE investigation on Galactic open clusters . II. Open cluster pairs, groups and complexes // Astronomy and Astrophysics. — 2017. — Апр. — Т. 600. — A106.
78. *Gao X.-H.* Membership determination of open cluster NGC 188 based on the DBSCAN clustering algorithm // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2014. — Февр. — Т. 14, № 2. — С. 159—164.
79. *Castro-Ginard A.* [и др.]. A new method for unveiling open clusters in Gaia. New nearby open clusters confirmed by DR2 // Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Окт. — Т. 618. — A59. — arXiv: [1805.03045 \[astro-ph.GA\]](#).

80. *Pasquato M., Milone A.* Multiple Stellar Populations in NGC 2808: a Case Study for Cluster Analysis // arXiv e-prints. — 2019. — Июнь. — arXiv:1906.04983. — arXiv: [1906.04983 \[astro-ph.SR\]](#).
81. *Bhattacharya S., Mahulkar V., Pandaokar S., Singh P. K.* Morphology of open clusters NGC 1857 and Czernik 20 using clustering algorithms // Astronomy and Computing. — 2017. — Янв. — Т. 18. — С. 1–7. — arXiv: [1611.00117 \[astro-ph.GA\]](#).
82. *Berdnikov L. N.* [и др.]. BVI_c Observations and Search for Evolutionary Variations in the Cepheid V811 Oph Period // Astronomy Reports. — 2020. — Апр. — Т. 64, № 4. — С. 310–318.
83. *Stetson P. B.* DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry // Publications of the ASP. — 1987. — Март. — Т. 99. — С. 191.
84. *Lang D., Hogg D. W., Mierle K., Blanton M., Roweis S.* Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images // Astronomical Journal. — 2010. — Май. — Т. 139, № 5. — С. 1782–1800. — arXiv: [0910.2233 \[astro-ph.IM\]](#).
85. *Hoag A. A.* [и др.]. Photometry of stars in galactic cluster fields // Publications of the U.S. Naval Observatory Second Series. — 1961. — Янв. — Т. 17. — С. 344–542.
86. *Henden A. A., Levine S., Terrell D., Welch D. L.* APASS - The Latest Data Release // American Astronomical Society Meeting Abstracts #225. Т. 225. — 01.2015. — С. 336.16. — (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
87. *Munari U.* Spectroscopy of young open clusters. // Mem. Societa Astronomica Italiana. — 1992. — Янв. — Т. 63. — С. 195–200.
88. *Munari U., Sordo R., Castelli F., Zwitter T.* An extensive library of 2500 10 500 Å synthetic spectra // Astronomy and Astrophysics. — 2005. — Ноябрь. — Т. 442, № 3. — С. 1127–1134. — arXiv: [astro-ph/0502047 \[astro-ph\]](#).
89. *Aller L. H.* [и др.]. Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series ” Gruppe/Group 6 Astronomy and Astrophysics ” Volume 2 Schaifers/Voigt: Astronomy and Astrophysics / Astronomie und Astrophysik ” Stars and Star Clusters / Sterne und Sternhaufen. Т. 2. — 01.1982. — (Landolt-Börnstein: Group 6: Astronomy).

90. *Gray R. O., Corbally Christopher J.* Stellar Spectral Classification. — 2009.
91. *Turner D. G.* New determinations of R in open clusters. // *Astronomical Journal*. — 1976. — Дек. — Т. 81. — С. 1125—1133.
92. *Turner D. G.* Color-Magnitude Diagrams for Young Open Clusters // *The Origins, Evolution, and Destinies of Binary Stars in Clusters*. Т. 90 / под ред. E. F. Milone, J. -. Mermilliod. — 01.1996. — С. 443. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
93. *Bressan A.* [и др.]. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — Ноябрь. — Т. 427, № 1. — С. 127—145. — arXiv: [1208.4498](https://arxiv.org/abs/1208.4498) [[astro-ph.SR](https://arxiv.org/abs/1208.4498)].
94. *Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., Fouesneau M., Demleitner M., Andrae R.* Estimating Distances from Parallaxes. V. Geometric and Photogeometric Distances to 1.47 Billion Stars in Gaia Early Data Release 3 // *Astronomical Journal*. — 2021. — Март. — Т. 161, № 3. — С. 147. — arXiv: [2012.05220](https://arxiv.org/abs/2012.05220) [[astro-ph.SR](https://arxiv.org/abs/2012.05220)].
95. *Green G. M., Schlafly E., Zucker C., Speagle J. S., Finkbeiner D.* A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS // *Astrophysical Journal*. — 2019. — Дек. — Т. 887, № 1. — С. 93. — arXiv: [1905.02734](https://arxiv.org/abs/1905.02734) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1905.02734)].
96. *Schlafly E. F., Finkbeiner D. P.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *Astrophysical Journal*. — 2011. — Август. — Т. 737, № 2. — С. 103. — arXiv: [1012.4804](https://arxiv.org/abs/1012.4804) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1012.4804)].
97. *Capitanio L., Lallement R., Vergely J. L., Elyajouri M., Monreal-Ibero A.* Three-dimensional mapping of the local interstellar medium with composite data // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — Октябрь. — Т. 606. — A65. — arXiv: [1706.07711](https://arxiv.org/abs/1706.07711) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1706.07711)].
98. *Boubert D., Everall A.* Completeness of the Gaia verse II: what are the odds that a star is missing from Gaia DR2? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Октябрь. — Т. 497, № 4. — С. 4246—4261. — arXiv: [2005.08983](https://arxiv.org/abs/2005.08983) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/2005.08983)].

99. *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. — ИЮНЬ. — Т. 467, № 3. — С. 2517–2528. — arXiv: [1702.03141 \[astro-ph.GA\]](#).
100. *Kroupa P.* On the variation of the initial mass function // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2001. — АПР. — Т. 322, № 2. — С. 231–246. — arXiv: [astro-ph/0009005 \[astro-ph\]](#).
101. *Eker Z.* [и др.]. Main-Sequence Effective Temperatures from a Revised Mass-Luminosity Relation Based on Accurate Properties // Astronomical Journal. — 2015. — АПР. — Т. 149, № 4. — С. 131. — arXiv: [1501.06585 \[astro-ph.SR\]](#).
102. *Virtanen P.* [и др.]. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nature Methods. — 2020. — Т. 17. — С. 261–272.
103. *Borodina O. I., Carraro G., Seleznev A. F., Danilov V. M.* Unresolved Multiple Stars and Galactic Clusters' Mass Estimates // Astrophysical Journal. — 2021. — ФЕВР. — Т. 908, № 1. — С. 60. — arXiv: [2101.01417 \[astro-ph.SR\]](#).
104. *Smith R., Jeffries R. D.* Dust discs around intermediate-mass and Sun-like stars in the 16 Myr old NGC 1960 open cluster // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2012. — МАРТ. — Т. 420, № 4. — С. 2884–2898. — arXiv: [1110.4219 \[astro-ph.GA\]](#).
105. *Haisch Karl E. J., Lada E. A., Lada C. J.* Disk Frequencies and Lifetimes in Young Clusters // Astrophysical Journal, Letters. — 2001. — ИЮНЬ. — Т. 553, № 2. — С. L153–L156. — arXiv: [astro-ph/0104347 \[astro-ph\]](#).
106. *Zhong J.* [и др.]. Exploring open cluster properties with Gaia and LAMOST // Astronomy and Astrophysics. — 2020. — АВГ. — Т. 640. — A127. — arXiv: [2006.06929 \[astro-ph.GA\]](#).
107. *Cantat-Gaudin T.* [и др.]. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters // Astronomy and Astrophysics. — 2020. — АВГ. — Т. 640. — A1. — arXiv: [2004.07274 \[astro-ph.GA\]](#).
108. *He Z.* [и др.]. A Blind All-sky Search for Star Clusters in Gaia EDR3: 886 Clusters within 1.2 kpc of the Sun // Astrophysical Journal, Supplement. — 2022. — СЕНТ. — Т. 262, № 1. — С. 7. — arXiv: [2206.12170 \[astro-ph.GA\]](#).

109. *Sanner J., Altmann M., Brunzendorf J., Geffert M.* Photometric and kinematic studies of open star clusters. II. NGC 1960 (M 36) and NGC 2194 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2000. — Май. — Т. 357. — С. 471–483. — arXiv: [astro-ph/0003327](#) [[astro-ph](#)].
110. *Thompson B. A., Frinchaboy P. M., Spoo T., Donor J.* The Binary INformation from Open Clusters Using SEDs (BINOCS) Project: Reliable Photometric Mass Determinations of Binary Star Systems in Clusters // *Astronomical Journal*. — 2021. — Апр. — Т. 161, № 4. — С. 160. — arXiv: [2101.07857](#) [[astro-ph.SR](#)].
111. *Joshi Y. C.* [и др.]. Photometric, kinematic, and variability study in the young open cluster NGC 1960 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Март. — Т. 492, № 3. — С. 3602–3621. — arXiv: [2001.04068](#) [[astro-ph.SR](#)].
112. *Seleznev A. F.* Open-cluster density profiles derived using a kernel estimator // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Март. — Т. 456, № 4. — С. 3757–3773. — arXiv: [1601.03898](#) [[astro-ph.GA](#)].
113. *Jeffries R. D., Naylor T., Mayne N. J., Bell C. P. M., Littlefair S. P.* A lithium depletion boundary age of 22 Myr for NGC 1960 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — СЕНТ. — Т. 434, № 3. — С. 2438–2450. — arXiv: [1306.6339](#) [[astro-ph.SR](#)].
114. *Bell C. P. M., Naylor T., Mayne N. J., Jeffries R. D., Littlefair S. P.* Pre-main-sequence isochrones - II. Revising star and planet formation timescales // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — СЕНТ. — Т. 434, № 1. — С. 806–831. — arXiv: [1306.3237](#) [[astro-ph.SR](#)].
115. *Alonso-Santiago J.* [и др.]. Stellar Population Astrophysics (SPA) with the TNG. Stock 2, a little-studied open cluster with an eMSTO // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Дек. — Т. 656. — A149. — arXiv: [2109.13959](#) [[astro-ph.GA](#)].
116. *Casamiquela L., Gebran M., Agüeros M. A., Bouy H., Soubiran C.* Chemically Peculiar Stars in the Open Cluster Stock 2 // *Astronomical Journal*. — 2022. — Дек. — Т. 164, № 6. — С. 255. — arXiv: [2210.09301](#) [[astro-ph.SR](#)].

117. *Carrera R.* [и др.]. Open clusters in APOGEE and GALAH. Combining Gaia and ground-based spectroscopic surveys // *Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — Март. — Т. 623. — A80. — arXiv: [1901.09302 \[astro-ph.GA\]](#).
118. *Mermilliod J. C., Mayor M., Udry S.* Red giants in open clusters. XIV. Mean radial velocities for 1309 stars and 166 open clusters // *Astronomy and Astrophysics*. — 2008. — Июль. — Т. 485, № 1. — С. 303–314.
119. *O'Donnell J. E.* R v -dependent Optical and Near-Ultraviolet Extinction // *Astrophysical Journal*. — 1994. — Февр. — Т. 422. — С. 158.
120. *Milone A. P.* [и др.]. The ACS survey of Galactic globular clusters. XII. Photometric binaries along the main sequence // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Апр. — Т. 540. — A16. — arXiv: [1111.0552 \[astro-ph.SR\]](#).
121. *Cordoni G.* [и др.]. Extended Main-sequence Turnoff as a Common Feature of Milky Way Open Clusters // *Astrophysical Journal*. — 2018. — Дек. — Т. 869, № 2. — С. 139. — arXiv: [1811.01192 \[astro-ph.SR\]](#).
122. *Cordoni G.* [и др.]. Photometric binaries, mass functions, and structural parameters of 78 Galactic open clusters // *Astronomy and Astrophysics*. — 2023. — Апр. — Т. 672. — A29. — arXiv: [2302.03685 \[astro-ph.SR\]](#).
123. *Hallakoun N., Maoz D.* A bottom-heavy initial mass function for the likely-accreted blue-halo stars of the Milky Way // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — Окт. — Т. 507, № 1. — С. 398–413. — arXiv: [2009.05047 \[astro-ph.GA\]](#).
124. *Gray R. O., Corbally Christopher J.* *Stellar Spectral Classification*. — 2009.
125. *Yalyalieva L., Carraro G., Glushkova E., Munari U., Ochner P.* The young Galactic cluster NGC 225: binary stars' content and total mass estimate // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Июль. — Т. 513, № 4. — С. 5299–5309. — arXiv: [2204.12558 \[astro-ph.GA\]](#).
126. *Hunt E. L., Reffert S.* Improving the open cluster census. II. An all-sky cluster catalogue with Gaia DR3 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2023. — Май. — Т. 673. — A114. — arXiv: [2303.13424 \[astro-ph.GA\]](#).

Приложение А

Двухцветные диаграммы и диаграммы «цвет-звездная величина» найденных групп в окрестностях Sco OB1

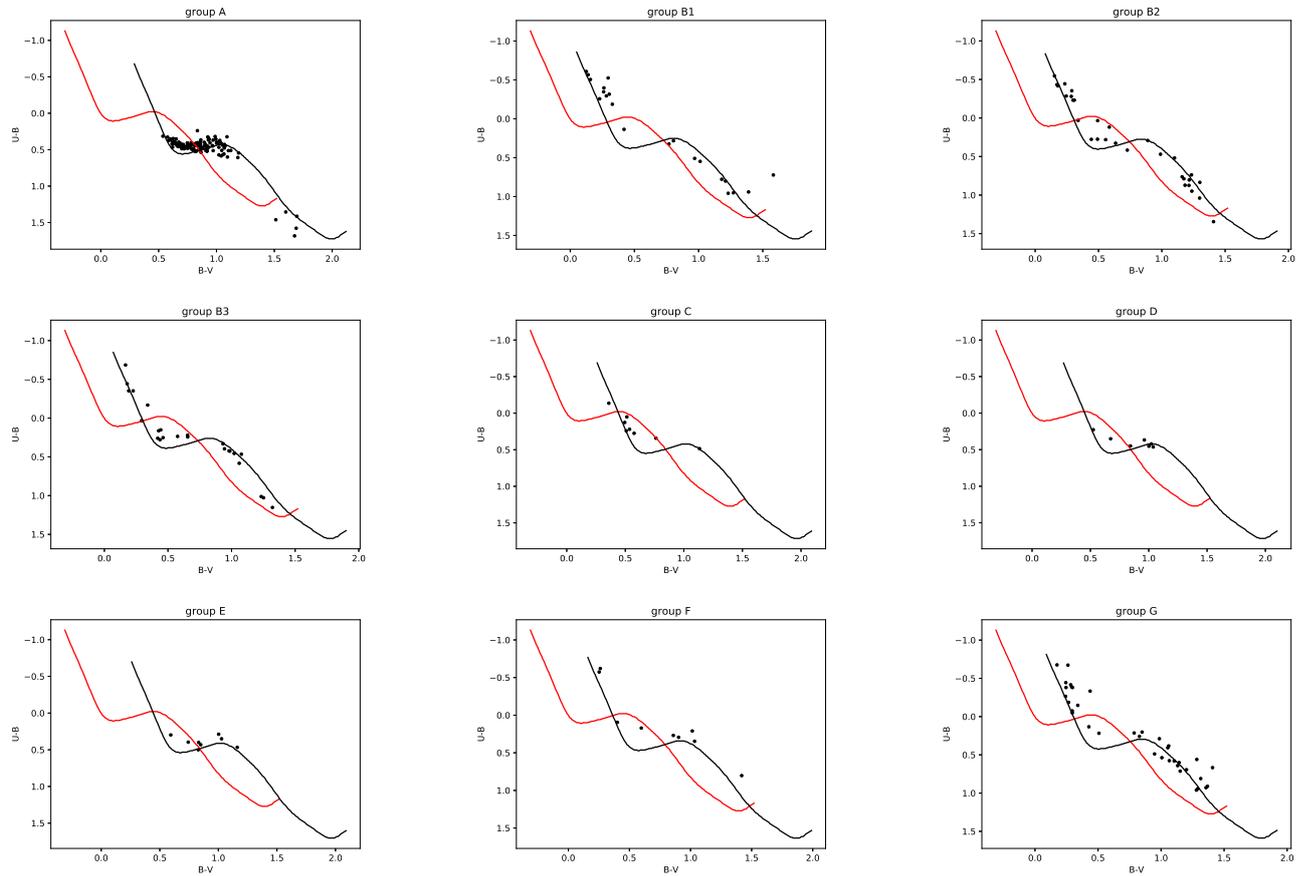


Рисунок А.1 — Двухцветные диаграммы найденных групп. Красным цветом показаны начальные главные последовательности, черным цветом – они же, но сдвинутые на величины избытков цвета.

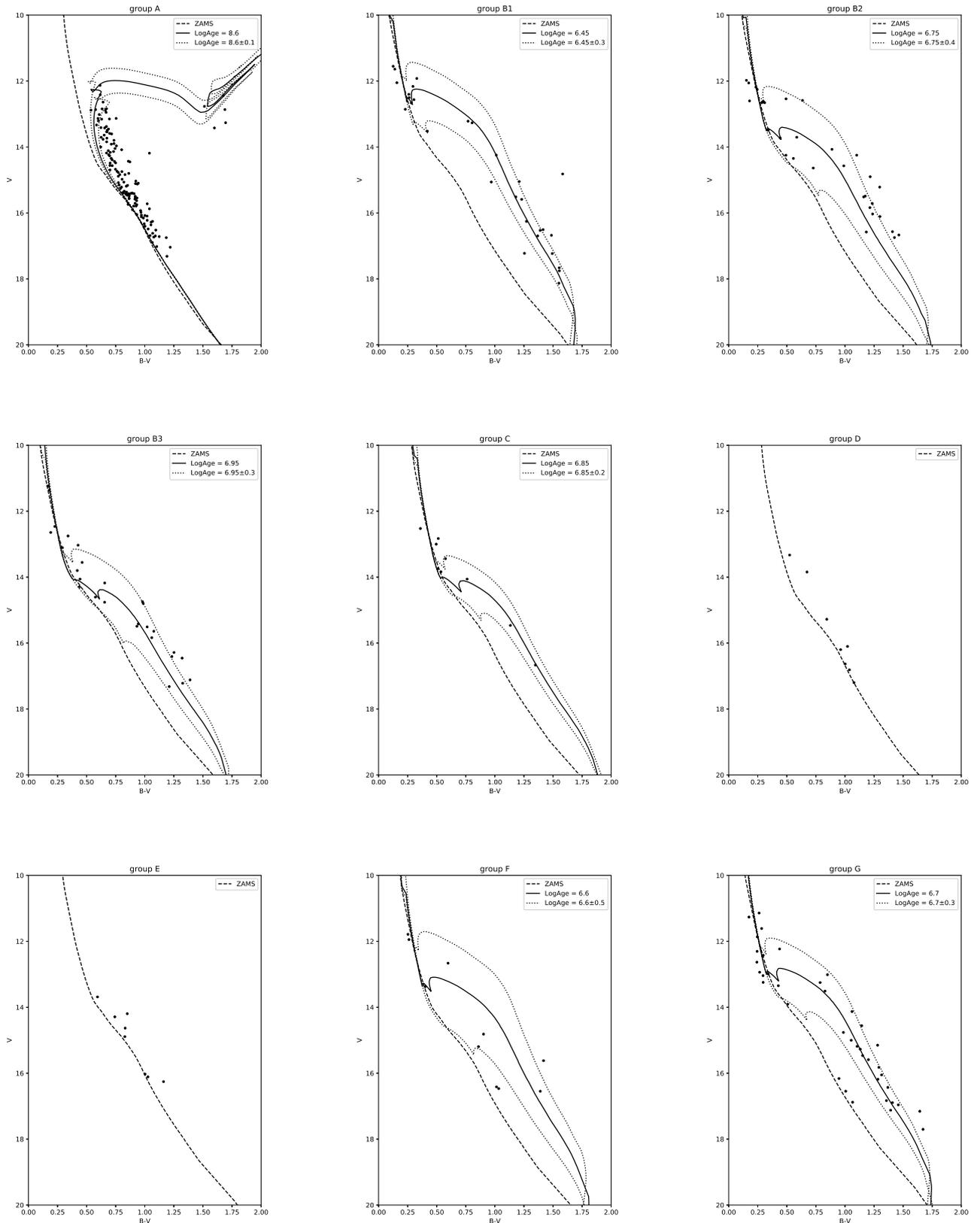


Рисунок А.2 — Диаграммы цвет-звездная величина найденных групп.

Черными пунктирными линиями изображены начальные главные последовательности, сдвинутые на величину избытка цвета и модуля расстояния, а сплошными линиями — сдвинутые изохроны. Для групп D и E возраст оценивался по ярчайшим звездам.

Приложение Б

Список звезд – членов скопления NGC 225

Список членов скопления с вероятностью членства $P > 50\%$. Звездная величина G_{Gaia} , собственное движение и параллаксы взяты из Gaia DR2. Символом «*» отмечена исключенная из рассмотрения звезда.

Таблица 25 – (начало)

№	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_\alpha \cos\delta$, мсд год ⁻¹	μ_δ , мсд год ⁻¹	P	P по [2]
s001	00:44:40.81	+61:48:43.3	9.2	1.42	-5.01	-0.32	0.98	0.2
s002	00:44:30.67	+61:46:49.9	9.6	1.4	-6.13	0.64	0.77	-
s003	00:44:40.46	+61:54:01.8	9.6	1.32	-5.42	-0.13	0.96	-
s004	00:44:46.41	+61:52:31.4	10.0	1.44	-6.83	-0.64	0.69	-
s005	00:43:26.58	+61:45:55.7	10.1	1.36	-5.87	0.48	0.86	0.5
s006	00:43:51.06	+61:50:08.3	10.6	1.41	-5.24	0.06	0.98	0.8
s007	00:43:51.47	+61:47:13.5	10.8	1.35	-5.12	0.05	0.97	0.5
s008	00:43:21.88	+61:27:10.7	10.8	1.39	-5.24	-0.12	0.98	0.5
s009	00:43:28.88	+61:48:04.0	10.9	1.44	-5.24	-0.24	0.98	0.6
s010	00:46:00.67	+61:44:14.5	11.0	1.41	-5.2	-0.22	0.98	0.4
s011	00:42:46.90	+61:36:23.0	11.2	1.43	-5.27	-0.14	0.98	0.8
s012	00:43:07.74	+61:29:52.3	11.3	1.48	-5.36	-0.2	0.98	0.6
s013	00:44:12.81	+61:51:01.8	11.4	1.3	-5.91	-0.46	0.85	-
s014	00:40:12.49	+61:41:30.0	11.4	1.49	-3.95	-0.77	0.68	-
s015	00:43:25.62	+61:48:51.6	11.5	1.48	-5.26	-0.08	0.98	0.7
s016	00:43:36.93	+61:53:40.1	12.0	1.45	-6.04	0.03	0.95	0.6
s017	00:46:41.32	+61:44:27.4	12.1	1.5	-5.34	-0.06	0.97	0.4
s018	00:43:31.00	+61:48:10.1	12.1	1.37	-4.77	-0.82	0.85	0.1
s019	00:41:02.54	+61:33:51.5	12.3	1.39	-5.32	-0.08	0.98	0.8
s020	00:44:16.53	+61:50:44.0	12.3	1.42	-5.29	-0.15	0.98	0.7
s021	00:40:30.79	+61:40:17.5	12.5	1.15	-5.32	0.09	0.64	-
s022	00:44:11.73	+61:40:16.6	12.6	1.44	-5.42	-0.09	0.98	0.8
s023	00:41:35.10	+61:39:42.2	12.6	1.45	-5.35	-0.04	0.98	0.8
s024	00:44:20.73	+61:49:45.1	13.0	1.36	-5.35	-0.03	0.97	1.0
s025	00:45:25.60	+61:40:23.2	13.1	1.4	-4.74	-0.15	0.96	0.1
s026	00:43:18.87	+61:41:14.4	13.2	1.45	-5.37	-0.19	0.98	0.9
s027	00:44:47.94	+61:53:38.3	13.3	1.44	-5.39	-0.06	0.98	0.9
s028	00:43:05.53	+61:53:43.8	13.3	1.43	-5.31	-0.16	0.98	0.7
s029	00:42:50.93	+61:43:21.8	13.4	1.45	-5.42	-0.25	0.98	0.9
s030	00:43:25.72	+61:40:31.8	13.4	1.41	-5.97	-0.14	0.97	0.5
s031	00:40:52.30	+61:43:14.4	13.6	1.48	-4.64	-0.22	0.93	0.1
s032	00:44:14.76	+61:40:21.7	13.9	1.42	-5.22	-0.04	0.98	0.7
s033	00:41:14.85	+61:35:30.2	14.0	1.25	-5.67	-1.32	0.52	-
s034	00:43:48.95	+61:52:51.8	14.1	1.4	-5.38	-0.35	0.98	0.5
s035	00:45:35.25	+61:55:03.4	14.1	1.45	-5.28	-0.23	0.98	0.7

Таблица 25 — (продолжение)

№	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_\alpha \cos\delta$, мсд год ⁻¹	μ_δ , мсд год ⁻¹	P	P по [2]
s036	00:43:43.35	+61:43:04.5	14.2	1.39	-5.84	-0.41	0.96	0.3
s037	00:45:06.51	+61:51:52.7	14.2	1.4	-5.18	-0.46	0.97	0.3
s038	00:45:19.99	+61:42:11.4	14.5	1.58	-5.4	-0.11	0.88	-
s039	00:45:18.66	+61:55:22.1	14.6	1.52	-5.66	-0.15	0.96	0.5
s040	00:41:08.21	+61:49:00.5	14.7	1.43	-5.33	0.07	0.98	0.8
s041	00:40:37.06	+61:53:53.8	14.9	1.43	-5.53	-0.13	0.98	0.8
s042	00:40:12.88	+61:41:31.4	14.9	1.49	-5.49	0.15	0.97	-
s043	00:45:49.65	+61:42:43.5	15.1	1.39	-5.48	0.05	0.98	0.8
s044	00:46:07.88	+61:45:06.1	15.1	1.48	-6.12	0.3	0.89	0.5
s045	00:40:47.91	+61:46:33.6	15.2	1.46	-5.37	-0.2	0.98	0.7
s046	00:45:09.60	+61:51:31.3	15.2	1.38	-5.44	0.1	0.98	0.8
s047	00:45:36.42	+61:57:58.9	15.5	1.42	-6.39	-0.22	0.89	-
s048	00:45:08.93	+61:38:36.1	15.5	1.48	-5.46	0.11	0.97	0.6
s049	00:46:25.80	+61:53:37.6	15.6	1.43	-3.77	-0.88	0.64	-
s050	00:40:27.47	+61:46:21.9	15.6	1.42	-5.44	-0.04	0.98	0.8
*s051	00:44:35.54	+61:25:28.8	15.6	1.33	-3.44	-0.44	0.62	-
s052	00:44:46.99	+61:42:53.8	15.7	1.34	-3.5	-0.37	0.65	-
s053	00:41:54.71	+61:44:10.5	15.7	1.46	-5.26	0.03	0.98	0.7
s054	00:40:37.32	+61:57:15.7	15.8	1.47	-5.39	-0.06	0.98	0.7
s055	00:42:49.15	+62:07:45.6	15.9	1.35	-7.13	0.78	0.51	-
s056	00:41:41.22	+61:53:59.0	15.9	1.36	-4.76	-0.33	0.95	0.1
s057	00:43:35.36	+61:44:31.5	16.0	1.4	-5.35	-0.13	0.98	0.8
s058	00:42:40.78	+61:37:22.3	16.0	1.38	-5.36	-0.16	0.98	0.9
s059	00:40:42.27	+61:36:09.4	16.0	1.44	-5.23	-0.07	0.98	0.5
s060	00:43:16.77	+61:50:15.2	16.1	1.43	-5.82	1.22	0.55	-
s061	00:44:07.20	+62:03:30.4	16.2	1.41	-5.22	-0.15	0.98	0.6
s062	00:42:30.29	+61:40:47.7	16.3	1.4	-5.53	-0.2	0.98	0.8
s063	00:43:14.64	+62:09:21.2	16.3	1.24	-4.44	0.14	0.72	-
s064	00:40:31.44	+61:56:55.0	16.3	1.33	-5.71	-0.06	0.96	-
s065	00:42:21.24	+61:39:43.0	16.3	1.42	-5.32	-0.12	0.98	0.7
s066	00:41:15.67	+61:31:05.9	16.5	1.56	-5.34	0.03	0.91	-
s067	00:43:15.29	+62:07:26.1	16.5	1.34	-5.59	0.22	0.95	0.5
s068	00:43:55.29	+61:52:38.6	16.5	1.57	-5.14	0.04	0.9	-
s069	00:44:09.51	+61:42:54.9	16.7	1.35	-5.18	-0.18	0.97	0.4
s070	00:44:05.50	+62:02:13.8	16.8	1.43	-5.65	0.05	0.98	0.7
s071	00:42:41.18	+61:49:10.1	16.8	1.45	-5.73	1.07	0.65	-
s072	00:44:24.93	+61:49:58.5	16.9	1.51	-5.3	0.25	0.95	0.5
s073	00:44:17.30	+61:55:07.7	16.9	1.4	-5.4	-0.15	0.98	0.7
s074	00:41:50.85	+61:58:22.4	17.0	1.43	-5.27	-0.04	0.98	0.4
s075	00:44:10.57	+62:02:03.7	17.0	1.36	-4.01	-1.01	0.66	-
s076	00:45:06.70	+61:37:39.5	17.2	1.38	-5.77	-0.19	0.97	0.4
s077	00:43:47.32	+62:05:31.0	17.2	1.7	-4.31	-0.01	0.5	-
s078	00:42:31.63	+61:45:30.6	17.2	1.42	-5.5	-0.18	0.98	0.6
s079	00:42:30.56	+61:32:27.6	17.2	1.55	-5.49	-0.32	0.92	-
s080	00:43:03.84	+61:45:32.4	17.3	1.45	-6.0	0.26	0.94	0.6
s081	00:43:05.72	+61:39:49.6	17.4	1.17	-6.53	0.01	0.55	-
s082	00:43:28.66	+61:49:18.5	17.4	1.38	-5.2	-0.1	0.98	0.5

Таблица 25 — (продолжение)

№	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_\alpha \cos\delta$, мсд год $^{-1}$	μ_δ , мсд год $^{-1}$	P	P по [2]
s083	00:45:42.85	+61:38:36.2	17.4	1.36	-5.01	0.6	0.81	0.1
s084	00:43:16.66	+61:49:09.3	17.5	1.54	-5.11	0.11	0.93	-
s085	00:46:15.54	+61:41:18.6	17.5	1.51	-5.12	0.16	0.96	0.4
s086	00:40:46.66	+61:43:58.5	17.5	1.27	-5.16	-0.2	0.89	-
s087	00:41:22.97	+61:47:53.4	17.6	1.38	-5.27	-0.06	0.98	0.6
s088	00:44:44.44	+61:42:58.5	17.6	1.5	-5.22	-0.34	0.97	0.5
s089	00:40:16.25	+61:50:39.7	17.6	1.46	-5.42	-0.38	0.98	-
s090	00:43:53.48	+61:43:42.8	17.7	1.44	-5.44	0.39	0.95	0.4
s091	00:42:57.00	+61:54:40.7	17.8	1.54	-5.71	0.93	0.62	-
s092	00:42:45.07	+61:48:03.7	17.8	1.36	-4.84	-0.56	0.92	0.2
s093	00:43:25.87	+61:39:56.7	17.8	1.59	-5.33	0.05	0.88	-
s094	00:44:49.01	+61:47:40.1	17.8	1.3	-5.52	0.07	0.93	-
s095	00:41:02.70	+61:31:45.3	17.9	1.32	-4.97	-0.42	0.91	-
s096	00:44:10.38	+61:47:25.8	17.9	1.51	-5.47	-0.27	0.97	0.5
s097	00:44:54.76	+61:40:56.6	17.9	1.17	-5.31	-0.44	0.67	-
s098	00:42:45.38	+61:46:45.1	18.0	1.39	-5.51	0.37	0.95	0.4
s099	00:42:26.85	+61:54:00.4	18.0	1.22	-5.26	-0.31	0.77	-
s100	00:40:56.82	+61:57:39.0	18.0	1.35	-5.44	-0.12	0.97	-
s101	00:42:11.84	+61:34:43.9	18.1	1.65	-4.44	-0.69	0.56	-
s102	00:42:08.48	+61:55:57.5	18.1	1.55	-5.43	0.36	0.88	-
s103	00:41:34.23	+61:29:19.6	18.2	1.41	-5.27	-0.31	0.98	-
s104	00:46:24.32	+61:53:44.3	18.2	1.33	-4.87	-1.32	0.62	-
s105	00:43:28.66	+61:47:18.7	18.3	1.44	-4.8	-0.86	0.85	-
s106	00:44:04.17	+61:53:30.2	18.4	1.46	-5.92	0.05	0.96	-
s107	00:46:55.77	+61:43:46.2	18.4	1.49	-5.2	-0.48	0.96	-
s108	00:44:17.22	+61:50:32.7	18.4	1.21	-5.33	-0.31	0.77	-
s109	00:44:17.00	+61:43:21.0	18.4	1.64	-5.34	0.36	0.69	-
s110	00:42:50.68	+61:48:46.0	18.5	1.49	-5.11	-0.12	0.97	-
s111	00:42:13.88	+61:57:02.0	18.5	1.13	-5.27	-0.31	0.6	-
s112	00:46:16.24	+61:32:28.7	18.5	1.49	-5.08	-0.38	0.97	-
s113	00:42:13.54	+61:59:10.7	18.5	1.25	-5.61	0.34	0.8	-
s114	00:44:46.60	+61:44:02.6	18.6	1.59	-5.7	-0.06	0.86	-
s115	00:44:26.51	+61:47:43.8	18.6	1.72	-5.02	-0.36	0.53	-
s116	00:43:46.04	+61:58:12.1	18.6	1.22	-5.86	-0.68	0.68	-
s117	00:43:34.31	+62:11:00.3	18.6	1.44	-5.19	-0.38	0.98	-
s118	00:47:04.85	+61:41:07.8	18.6	1.28	-4.13	-0.51	0.73	-
s119	00:43:47.53	+61:53:27.5	18.6	1.36	-4.99	0.01	0.97	-
s120	00:44:20.64	+61:45:45.6	18.7	1.33	-5.2	0.05	0.96	-
s121	00:44:30.13	+61:46:20.2	18.7	1.17	-5.94	-0.11	0.66	-
s122	00:41:25.27	+61:37:41.5	18.7	1.32	-5.01	-0.78	0.83	-
s123	00:45:09.05	+61:41:49.0	18.8	1.44	-5.51	-0.32	0.98	-
s124	00:44:18.79	+62:03:44.7	18.9	1.25	-4.97	-0.88	0.71	-
s125	00:46:21.85	+61:48:37.8	19.0	1.44	-5.32	0.18	0.97	-
s126	00:45:45.89	+61:29:46.5	19.1	1.68	-5.81	-0.24	0.61	-
s127	00:44:48.58	+61:34:29.6	19.2	1.35	-5.43	-0.48	0.95	-
s128	00:44:54.27	+61:50:36.5	19.2	1.52	-5.29	-0.46	0.94	-

Таблица 25 — (продолжение)

№	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_{\alpha} \cos\delta$, мсд год ⁻¹	μ_{δ} , мсд год ⁻¹	P	P по [2]
s129	00:42:49.29	+61:59:25.9	19.3	1.68	-6.1	-0.66	0.56	-

Приложение В

Список звезд – членов скопления FSR 866

Список первых самых ярких 50 членов скопления с вероятностью членства $P > 98.5\%$. Звездная величина G_{Gaia} , собственное движение и параллаксы взяты из Gaia DR3.

Таблица 26 – (начало)

№	Gaia id	RA,	Dec,	G_{Gaia} ,	Plx,	$\mu_{\alpha} \cos\delta$,	μ_{δ} ,	P
		h:m:s	d:m:s	мсд	мсд	мсд год ⁻¹	мсд год ⁻¹	
s1	888520848262153472	06:55:23.08	+29:52:57.1	10.1	0.86	1.31	-0.31	1.0
s2	887731192753683200	06:55:14.37	+29:29:00.3	10.9	0.78	1.32	-0.22	1.0
s3	887745417685316096	06:56:08.29	+29:36:06.1	11.0	0.83	1.34	-0.37	1.0
s4	888514010673684992	06:55:20.90	+29:49:47.1	11.1	0.66	1.43	-0.33	0.99
s5	888511949089584896	06:55:04.21	+29:45:55.4	11.3	0.78	1.26	-0.38	1.0
s6	888515312046165120	06:55:10.94	+29:53:45.8	11.9	0.84	1.37	-0.45	1.0
s7	887761047071315200	06:55:10.32	+29:43:39.9	12.2	0.84	1.4	-0.29	1.0
s8	888514349974264448	06:54:59.75	+29:49:04.7	12.5	0.84	1.25	-0.33	1.0
s9	887761562467259776	06:55:31.53	+29:43:12.4	12.7	0.75	1.37	-0.21	1.0
s10	888511399333602048	06:54:53.03	+29:43:27.8	12.8	0.77	1.1	0.1	0.99
s11	887762872432289792	06:55:38.26	+29:46:21.1	13.0	0.84	1.42	-0.38	1.0
s12	887757993349449088	06:55:44.42	+29:39:07.0	13.1	0.81	1.34	-0.4	1.0
s13	888492845074903168	06:54:09.83	+29:45:41.6	13.2	0.62	1.45	-0.26	0.99
s14	888513289119188864	06:55:18.74	+29:46:33.8	13.2	0.81	1.32	-0.45	1.0
s15	887760978351838592	06:55:14.96	+29:43:34.2	13.2	0.85	1.32	-0.39	1.0
s16	888512017808878336	06:55:01.86	+29:46:52.8	13.2	0.81	1.37	-0.46	1.0
s17	887761017006432896	06:55:08.88	+29:42:44.9	13.3	0.81	0.79	-0.12	0.99
s18	888511188878341120	06:54:58.09	+29:42:28.7	13.3	0.84	1.39	-0.38	1.0
s19	887735762598740608	06:55:00.98	+29:36:23.0	13.4	0.81	1.43	-0.41	1.0
s20	887764109382961408	06:56:19.31	+29:44:10.4	13.4	0.8	1.49	-0.52	1.0
s21	888515213264527488	06:55:11.03	+29:52:25.6	13.4	0.76	1.34	-0.43	1.0
s22	888492123520392064	06:54:19.97	+29:45:01.2	13.4	0.82	1.4	-0.39	1.0
s23	887732120466610432	06:55:19.64	+29:31:08.9	13.4	0.81	1.35	-0.36	1.0
s24	888524833991246976	06:55:26.65	+29:58:56.7	13.4	0.78	1.44	-0.44	1.0
s25	888519576951472768	06:54:45.08	+29:58:05.3	13.5	0.8	1.42	-0.46	1.0
s26	887769057185193472	06:55:38.43	+29:48:40.1	13.5	0.81	1.26	-0.42	1.0
s27	887761184510269312	06:55:33.75	+29:41:23.0	13.5	0.87	1.41	-0.39	1.0
s28	888511639851762304	06:55:06.02	+29:43:44.4	13.5	0.8	1.05	-0.63	1.0
s29	887760398531147392	06:55:00.63	+29:40:06.1	13.6	0.79	1.37	-0.38	1.0
s30	887762769353075840	06:55:35.30	+29:45:41.6	13.6	0.89	1.48	-0.36	0.99
s31	887758714903948160	06:55:48.88	+29:42:24.0	13.6	0.78	1.31	-0.46	1.0
s32	888512705003655808	06:54:49.69	+29:46:20.6	13.6	0.8	1.24	-0.68	1.0
s33	887769435142308224	06:55:54.38	+29:51:51.1	13.6	0.79	1.27	-0.48	1.0
s34	888520710822642304	06:55:43.41	+29:54:55.8	13.6	0.81	1.43	-0.19	1.0
s35	888520985700556416	06:55:29.10	+29:54:21.2	13.7	0.78	1.39	-0.43	1.0
s36	888492467117786880	06:54:02.47	+29:44:32.9	13.7	0.79	1.35	-0.34	1.0
s37	887762803712816896	06:55:29.50	+29:45:32.3	13.7	0.79	1.33	-0.34	1.0

Таблица 26 — (продолжение)

№	Gaia id	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_\alpha \cos\delta$, мсд год ⁻¹	μ_δ , мсд год ⁻¹	P
s38	887756584600180352	06:55:36.46	+29:38:03.7	13.7	0.79	1.34	-0.42	1.0
s39	888529266397543040	06:54:24.55	+29:54:49.3	13.7	0.81	1.42	-0.47	1.0
s40	888512705003655168	06:54:50.28	+29:46:29.0	13.7	0.79	1.32	-0.49	1.0
s41	887761704201188480	06:55:41.06	+29:43:14.0	13.7	0.82	1.23	-0.53	1.0
s42	887759848775327104	06:55:21.12	+29:40:20.3	13.8	0.82	1.37	-0.46	1.0
s43	888513598356832128	06:55:14.96	+29:48:34.1	13.8	0.79	1.39	-0.4	1.0
s44	887762425755695232	06:55:28.56	+29:45:20.7	13.8	0.8	1.29	-0.38	1.0
s45	888511601195504128	06:55:00.98	+29:44:19.6	13.8	0.78	1.33	-0.38	1.0
s46	887762219597269760	06:55:24.44	+29:42:44.3	13.8	0.83	1.37	-0.45	1.0
s47	887764624778940800	06:56:09.95	+29:44:45.3	13.8	0.8	1.42	-0.42	1.0
s48	888518821037065984	06:54:46.00	+29:54:41.7	13.8	0.8	1.41	-0.23	1.0
s49	887763868864788480	06:56:27.88	+29:43:36.4	13.8	0.79	1.29	-0.42	1.0
s50	887762253957010304	06:55:18.96	+29:42:47.1	13.9	0.86	1.36	-0.16	1.0

Приложение Г

Список звезд – членов скопления NGC 1960

Список первых самых ярких 50 членов скопления с вероятностью членства $P > 95\%$. Звездная величина G_{Gaia} , собственное движение и параллаксы взяты из Gaia DR3.

Таблица 27 – (начало)

№	Gaia id	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_{\alpha} \cos\delta$, мсд год ⁻¹	μ_{δ} , мсд год ⁻¹	P
s1	3449328509329750272	05:37:50.95	+33:58:02.0	8.2	0.85	-0.26	-3.55	1.0
s2	3449518587403714432	05:36:15.80	+34:08:36.6	8.8	0.79	-0.61	-3.31	0.99
s3	3449524497278695936	05:36:23.05	+34:10:32.6	8.9	0.82	-0.32	-3.26	1.0
s4	3449514223716942464	05:36:39.26	+34:03:49.7	9.0	0.9	-0.11	-3.95	0.99
s5	3449518346885542272	05:36:22.66	+34:08:01.8	9.1	0.84	-0.15	-3.42	1.0
s6	3449524359839733632	05:36:32.00	+34:10:47.2	9.1	0.86	-0.12	-3.26	1.0
s7	3449521847281383168	05:36:42.30	+34:12:05.9	9.2	0.82	-0.12	-3.38	1.0
s8	3449518312525804032	05:36:21.94	+34:08:08.1	9.3	0.85	-0.26	-3.48	1.0
s9	3449521267463295488	05:36:28.03	+34:08:30.6	9.5	0.85	-0.14	-3.28	1.0
s10	3449515185789622400	05:36:23.84	+34:05:57.1	9.9	0.85	-0.43	-3.26	1.0
s11	3449518106367398784	05:36:02.39	+34:06:50.9	10.0	0.85	-0.22	-3.46	1.0
s12	3449519515117517824	05:36:09.77	+34:11:35.9	10.3	0.79	-0.25	-3.34	0.99
s13	3449518518684250752	05:36:07.20	+34:08:03.2	10.4	0.87	0.04	-3.67	0.99
s14	3449519549476397056	05:35:59.27	+34:10:27.3	10.6	0.84	-0.25	-3.28	1.0
s15	3449518243806341504	05:36:14.09	+34:07:08.1	10.6	0.85	-0.27	-3.71	1.0
s16	3449514258076685696	05:36:34.77	+34:03:55.4	10.7	0.85	-0.2	-3.26	1.0
s17	3449518617465979008	05:36:21.39	+34:09:41.0	10.7	0.88	-0.15	-3.39	1.0
s18	3449518553043977728	05:36:12.56	+34:08:58.5	10.7	0.85	-0.11	-3.36	1.0
s19	3449518278166077824	05:36:15.29	+34:07:12.4	10.8	0.88	-0.17	-3.3	1.0
s20	3449518312525808128	05:36:22.14	+34:07:13.7	11.2	0.89	-0.16	-3.54	1.0
s21	3449531128709000064	05:35:42.29	+34:10:54.6	11.2	0.83	-0.38	-3.26	1.0
s22	3449519343317970816	05:36:01.96	+34:09:17.6	11.2	0.83	0.1	-3.78	0.99
s23	3449513536522207360	05:36:23.50	+34:00:09.8	11.3	0.85	-0.26	-3.38	1.0
s24	3449540543276113536	05:36:33.43	+34:25:07.4	11.3	0.8	-0.48	-3.12	0.99
s25	3449518239508860928	05:36:11.54	+34:07:06.4	11.3	0.87	-0.22	-3.27	1.0
s26	3449530952612051968	05:35:51.66	+34:10:32.4	11.5	0.87	-0.15	-3.4	1.0
s27	3449525356268499456	05:36:19.49	+34:12:14.7	11.5	0.82	0.04	-3.38	0.99
s28	3449519304660746624	05:36:07.74	+34:09:25.0	11.5	0.74	-0.29	-3.38	0.99
s29	3449525459351362432	05:36:20.89	+34:12:43.0	11.7	0.81	-0.19	-3.44	1.0
s30	3449529681299548928	05:35:32.42	+34:10:19.2	11.8	0.84	-0.33	-3.72	0.99
s31	3449515323228563456	05:36:28.36	+34:07:21.4	11.8	0.88	-0.4	-3.5	0.99
s32	3449517930271217280	05:36:02.66	+34:06:06.1	11.9	0.8	-0.21	-3.46	1.0
s33	3449521434964524416	05:36:36.65	+34:10:24.7	11.9	0.84	0.34	-3.23	0.98
s34	3449514567314346240	05:36:21.18	+34:03:17.4	11.9	0.68	-0.45	-3.34	0.98
s35	3449515391948037760	05:36:28.04	+34:07:49.0	12.0	0.85	-0.21	-3.54	1.0
s36	3449514837894765312	05:36:16.62	+34:05:00.8	12.1	0.83	-0.47	-3.36	0.99
s37	3449514906614242688	05:36:29.31	+34:04:17.5	12.1	0.86	-0.08	-3.5	1.0

Таблица 27 — (продолжение)

№	Gaia id	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мгд	Plx, мгд	$\mu_{\alpha} \cos \delta$, мгд год ⁻¹	μ_{δ} , мгд год ⁻¹	P
s38	3449492474002644352	05:35:17.69	+33:56:34.5	12.2	0.83	-0.3	-3.46	1.0
s39	3449524492982265088	05:36:21.53	+34:09:51.1	12.2	0.8	-0.38	-3.62	0.99
s40	3449514258076681216	05:36:36.44	+34:04:17.1	12.2	0.87	-0.23	-3.48	1.0
s41	3449524565999149056	05:36:18.57	+34:10:46.0	12.2	0.83	-0.17	-3.63	1.0
s42	3449530437213792128	05:35:30.23	+34:10:58.8	12.3	0.83	-0.3	-3.45	1.0
s43	3449514739113043200	05:36:15.61	+34:03:25.1	12.3	0.82	-0.12	-3.38	1.0
s44	3449307579953679616	05:37:41.02	+33:48:46.7	12.3	0.87	-0.38	-3.18	1.0
s45	3449518209446597248	05:36:20.75	+34:06:50.1	12.3	0.84	-0.28	-3.55	1.0
s46	3449515254509102336	05:36:20.03	+34:06:11.4	12.3	0.85	-0.06	-3.32	1.0
s47	3449321117688761856	05:36:55.63	+33:52:42.8	12.3	0.88	-0.21	-3.4	1.0
s48	3449516457099974400	05:35:52.08	+34:04:33.5	12.3	0.73	-0.36	-3.22	0.99
s49	3449536896844598912	05:35:25.73	+34:20:47.0	12.3	0.88	0.02	-3.4	0.99
s50	3449520988288857984	05:36:33.94	+34:07:17.5	12.4	0.82	-0.35	-3.59	0.99

Приложение Д

Список звезд – членов скопления Stock 2

Список первых самых ярких 50 членов скопления с вероятностью членства $P > 95\%$. Звездная величина G_{Gaia} , собственное движение и параллаксы взяты из Gaia DR3.

Таблица 28 — (начало)

№	Gaia id	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_{\alpha} \cos\delta$, мсд год ⁻¹	μ_{δ} , мсд год ⁻¹	P
s1	459199662573391104	02:21:15.51	+59:14:52.3	7.0	2.67	15.34	-14.11	1.0
s2	506910564480154624	02:13:28.82	+59:11:45.4	7.2	2.7	16.18	-13.61	1.0
s3	507507702367267584	02:11:11.67	+59:58:51.1	7.8	2.65	15.91	-12.98	1.0
s4	459118882826608640	02:21:38.21	+58:47:02.8	7.8	2.6	15.33	-14.18	1.0
s5	507214579443494144	02:05:58.55	+60:16:41.9	7.9	2.65	16.73	-13.49	1.0
s6	459112148318029056	02:21:45.95	+58:34:24.0	8.0	2.8	16.18	-12.68	0.97
s7	459223645670638080	02:19:52.51	+59:31:39.7	8.1	2.65	15.74	-14.27	1.0
s8	459214196742707328	02:19:35.02	+59:18:29.4	8.2	2.66	15.51	-13.76	1.0
s9	507240967720664576	02:15:16.75	+59:20:05.6	8.3	2.7	17.46	-13.18	0.97
s10	507254264940286848	02:18:22.83	+59:22:33.4	8.4	2.64	15.44	-13.68	1.0
s11	507289792902722560	02:14:00.86	+59:24:05.4	8.5	2.68	16.08	-13.64	1.0
s12	507520106232760320	02:10:39.78	+60:04:43.3	8.5	2.62	16.21	-13.39	1.0
s13	507289036996187392	02:14:42.24	+59:23:40.7	8.6	2.69	16.14	-13.72	1.0
s14	459349814627528832	02:23:36.70	+59:55:15.9	8.6	2.64	15.0	-13.76	1.0
s15	507270860693863552	02:17:35.04	+59:32:09.2	8.6	2.68	15.51	-13.98	1.0
s16	507242926225718656	02:15:31.77	+59:23:05.5	8.6	2.72	15.57	-13.84	1.0
s17	507233683456274176	02:17:28.36	+59:22:00.4	8.7	2.63	15.64	-13.66	1.0
s18	507248698661749248	02:15:55.37	+59:24:08.5	8.8	2.76	16.05	-13.78	1.0
s19	507299104399421696	02:14:52.68	+59:38:36.7	8.9	2.67	15.66	-13.79	1.0
s20	507331196395875840	02:15:28.58	+59:56:03.8	9.0	2.45	16.67	-14.1	0.96
s21	507291270379138176	02:15:08.12	+59:30:11.7	9.0	2.53	15.9	-13.36	0.99
s22	507337827825302912	02:15:47.64	+60:02:11.1	9.1	2.72	16.27	-14.03	1.0
s23	506860742857349888	02:15:09.51	+59:06:28.9	9.1	2.66	15.93	-13.55	1.0
s24	507337518587632000	02:16:19.36	+60:03:37.4	9.2	2.7	16.16	-14.02	1.0
s25	507296493059132672	02:13:46.00	+59:37:07.1	9.2	2.67	15.79	-13.31	1.0
s26	507318655090452480	02:14:18.08	+59:54:10.7	9.3	2.68	16.36	-13.67	1.0
s27	506860055662585216	02:15:38.25	+59:05:29.4	9.4	2.69	16.29	-13.68	1.0
s28	507247908387713152	02:16:34.86	+59:29:19.6	9.4	2.68	15.46	-13.83	1.0
s29	507146783374181632	02:08:31.58	+59:58:05.9	9.4	2.66	14.56	-13.0	0.98
s30	507107067819817088	02:07:57.96	+59:29:33.7	9.4	2.71	16.52	-13.78	1.0
s31	507298726442317568	02:15:07.69	+59:36:03.9	9.4	2.92	16.08	-14.04	0.96
s32	507131669393378944	02:08:27.49	+59:36:10.6	9.5	2.71	16.27	-13.22	1.0
s33	507250004332136576	02:15:34.55	+59:29:04.9	9.5	2.68	16.0	-13.88	1.0
s34	507338068343455872	02:15:49.59	+60:03:22.7	9.6	2.89	15.14	-13.73	0.97
s35	459192378309095552	02:21:09.46	+58:59:52.2	9.6	2.53	14.54	-13.27	0.97
s36	507317108902236160	02:14:18.21	+59:49:59.2	9.7	2.66	16.01	-14.16	1.0
s37	506861292613136000	02:15:24.41	+59:09:45.1	9.7	2.66	15.35	-13.43	1.0

Таблица 28 — (продолжение)

№	Gaia id	RA, h:m:s	Dec, d:m:s	G_{Gaia} , мсд	Plx, мсд	$\mu_\alpha \cos\delta$, мсд год ⁻¹	μ_δ , мсд год ⁻¹	P
s38	459173480452018304	02:20:01.12	+59:04:14.2	9.7	2.59	15.09	-13.94	1.0
s39	507217809258879744	02:06:04.25	+60:24:37.2	9.7	2.74	16.81	-13.41	0.99
s40	507360333450223232	02:20:25.36	+59:47:54.9	9.7	2.66	15.24	-14.08	1.0
s41	459178703132426240	02:17:55.98	+58:54:17.3	9.8	2.64	15.0	-14.61	0.99
s42	506916714872599808	02:13:16.29	+59:19:32.6	9.8	2.68	15.32	-13.37	1.0
s43	507365246896272896	02:20:15.50	+59:52:34.2	9.8	2.7	15.16	-14.35	0.99
s44	507315219116671488	02:14:06.93	+59:43:58.9	9.9	2.65	15.81	-13.74	1.0
s45	507250760245977856	02:15:44.55	+59:32:59.3	9.9	2.67	15.63	-13.77	1.0
s46	507328168434977280	02:15:18.35	+59:48:55.4	9.9	2.68	15.92	-13.41	1.0
s47	507257593530437120	02:18:05.11	+59:25:39.2	9.9	2.66	15.73	-14.02	1.0
s48	507153041151569536	02:04:42.46	+59:27:01.3	9.9	2.68	16.87	-13.13	0.99
s49	506885997265899776	02:10:22.91	+58:52:16.2	10.0	2.7	16.69	-13.53	1.0
s50	507116585468397056	02:10:10.63	+59:32:32.9	10.0	2.64	16.3	-13.21	1.0