

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Ялялиева Лидия Наилевна

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

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

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

Официальные оппоненты: *Селезнев Антон Федорович,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры астрономии, геодезии,
экологии и мониторинга окружающей
среды УрФУ, старший научный сотрудник
Коуровской астрономической обсерва-
тории УрФУ*

*Бобылев Вадим Вадимович,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией динамики Га-
лактики ГАО РАН*

*Верещагин Сергей Викторович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник отдела фи-
зики звездных систем ИНАСАН*

Защита состоится 20 июня 2024 года в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: yalyalieva@sai.msu.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте диссертационного совета: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2939>

Автореферат разослан 25 апреля 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

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 измерения, 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 PЗC 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 PЗC 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 PЗC 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-квадрата). 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: $\log(\text{Age}/\text{yr})=8.0\text{-}8.2$, расстояние 667 ± 18 пк, $V_r = -9.8 \pm 0.7$ км с⁻¹;
 - FSR 866: $\log(\text{Age}/\text{yr}) = 9.57$, расстояние = 1330 пк, $V_r = 65.5 \pm 1.0$ км с⁻¹;
 - NGC 1960: $\log(\text{Age}/\text{yr}) = 7.48$, расстояние = 1202 пк, $V_r = -18.9 \pm 1.4$ км с⁻¹;
 - Stock 2: $\log(\text{Age}/\text{yr}) = 8.50$, 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 $M_\alpha = 155.2 \pm 2.0 M_\odot$ («плоское» распределение отношений масс компонентов двойных) до $M_\alpha = 170.5 \pm 2.2 M_\odot$ (случай равных по массе компонентов двойных звезд) с учетом доли двойных звезд, равной 0.52, и $M_0 = 125.3 \pm 1.7 M_\odot$ 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 исследовании 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.

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.

Во **Введении** описана актуальность темы, цели и задачи работы, научная новизна и методология, научная и практическая значимость исследования, достоверность 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. В разделе **1.1** описывается проведение фотометрических наблюдений области в направлении этих объектов и обработка полученных данных. В разделе **1.2.1** описывается метод кластеризации, который был применен для выявления в этой области групп звезд с похожими физическими параметрами. Рассказывается о нахождении расстояний найденных групп по полученным фотометрическим данным (раздел **1.2.2**), а также по данным Gaia DR2 (раздел **1.2.3**). Излагаются шаги и результаты по нахождению возраста исследуемых групп (раздел **1.2.4**), среднего собственного движения (раздел **1.2.5**). Полученные параметры групп анализируются в разделе **1.2.6** и делаются выводы о разделении групп на две подгруппы. В разделе **1.3** рассматривается вопрос наличия большого числа звезд до главной последовательности. Раздел **1.4** суммирует полученные результаты.

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 (раздел **2.1**) по данным Gaia DR2, а также рассматривается отличие этих данных от данных третьего релиза (раздел **2.2**). Раздел **2.3.1** посвящен получению и обработке фотометрических, а раздел **2.3.2** – спектроскопических данных. В разделе **2.4** находятся лучевые скорости звезд и средняя лучевая скорость скопления, а также описывается алгоритм определения двойных звезд по лучевым скоростям и оценка общей доли двойных звезд в скоплении. В разделе **2.5** определяются возраст и расстояние до NGC 225. Дается оценка массы скопления без (раздел

2.6.1) и с (раздел **2.6.2**) учетом наличия двойных звезд, делается вывод о влиянии наличия двойных звезд на эту оценку. Раздел **2.7** подытоживает результаты данной главы.

В **Главе 3** излагается исследование трех довольно сильно отличающихся по своим параметрам друг от друга рассеянных скоплений - FSR 866, NGC 1960 и Stock 2. Дается описание алгоритма определения вероятных звезд – членов скоплений (раздел **3.1**), описывается нахождение расстояний до скоплений и их возрастов с использованием фотометрических данных Gaia DR3 (раздел **3.2**). В разделе **3.3** дается описание метода нахождения доли двойных звезд по диаграмме «цвет-звездная величина». В разделе **3.4** рассказывается о получении и обработке спектроскопических данных для звезд рассматриваемых скоплений, а раздел **3.5** посвящен использованию полученных спектров для нахождения лучевых скоростей и спектральных типов звезд скоплений. Сравнение полученных лучевых скоростей с данными Gaia DR3 приводятся в разделе **3.6**. В разделе **3.7** рассказывается о методе определения доли двойных звезд в скоплении уже на основе лучевых скоростей. Выводы приводятся в разделе **3.6**

В **Заключении** представляются главные результаты диссертации, делаются основные выводы, описываются перспективы дальнейших исследований.

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. **Яляльева, 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%.

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 Astrophysis*. — 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., Gasymov 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.