

На правах рукописи

Сизова Мария Дмитриевна

СБЛИЖЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ СО ЗВЕЗДНЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ

Специальность 1.3.1.
Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

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

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук
Верещагин Сергей Викторович

Официальные оппоненты: **Глушкова Елена Вячеславовна,**
доктор физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры астрофизики и звёздной астрономии,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Селезнев Антон Федорович,
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, г.Санкт-Петербург

Защита состоится 9 сентября 2025 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института астрономии РАН и на сайте http://www.inasan.ru/scientific_activities/diss_council/diss/.

Автореферат разослан 3 июля 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

24.1.032.01, канд. физ.-мат. наук

Чупина Наталия Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Рассеянные звездные скопления (РЗС) важны для изучения как эволюции отдельных звезд, так и дисковой составляющей населения Галактики. В последние годы по данным Gaia удалось значительно увеличить наблюдательный материал для исследования скоплений. Обнаружены тысячи ранее неизвестных РЗС. Это предоставляет широкое поле деятельности для изучения скоплений, понимания их эволюции и строения. В работе [15] использован алгоритм Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN, [16]) для поиска звездных скоплений по данным Gaia DR3 (Gaia Collaboration, [17]). Результат [15] оказался революционным. Число обнаруженных скоплений $n = 7167$, 2385 из которых являются новыми объектами-кандидатами и 4782 из которых соответствуют объектам в литературе, в том числе 134 шаровых скопления. При более детальном подходе каталог [15] содержит надежные данные для 4105 скоплений, 739 из которых новые. В работе [15] указано, что многие скопления не удалось обнаружить, включая 1152 скопления из каталога [18] – (Milky Way Global Survey of star Clusters, далее MWSC). Многие из них можно детально исследовать и рассчитать вероятности членства звезд в скоплении, определить возраст, металличность и другие параметры. Процесс обработки данных привел к обнаружению обширных гало и приливных шлейфов (хвостов), образующихся в результате распада скоплений [19]. Согласно численным экспериментам, проведенным [20], в течение 150 млн.лет приливные шлейфы растягиваются на расстояние до 1.2 кпк. В работах [21], [22] найдены доказательства существования приливных шлейфов Гиад, содержащих звезды, потерянные скоплением. С учетом приливных шлейфов пространственные размеры скопления оказываются намного больше, чем считалось ранее (~ 100 пк от центра скопления). Структура Гиад постоянно уточняется [23]. Выбор достаточно разнообразных по возрасту, массе, химическому составу и положению в галактическом диске скоплений NGC 2158, King 11, Гиады позволил получить новые знания об их строении, кинематике, изучить эффекты влияния РЗС на малые тела при их возможном сближении с Солнечной системой в прошлом. Приливные шлейфы Гиад могут достигать до 800 пк, если они не были разрушены за последние 650 млн.лет из-за проходов вблизи ГМО, спиральных рукавов, ударных волн и других событий [21].

Целью данной работы является изучение рассеянных звездных скоплений как самостоятельных объектов и особенностей их движения в галактическом диске, в частности, возможных их сближений с Солнечной системой в прошлые эпохи. Это подразумевает определение и уточнение таких параметров, как возраст, расстояние от Солнца, металличность, а также пространственных скоростей и положений в диске. Подразумевается использование новейших наблюдательных данных Gaia.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить для NGC 2158 и King 11 – возраст, положение в пространстве и пространственную скорость. Использовать эти данные для расчета положения места рождения, изменения взаимного расположения РЗС и Солнца со временем, элементов и формы орбиты.
2. Разработать метод поиска скоплений, сближавшихся с Солнечной системой в прошлые эпохи.
3. Провести расчеты движения РЗС из окрестностей Солнца в галактическом диске. Найти параметры сближений РЗС с Солнечной системой. Составить каталог параметров сближений РЗС с Солнечной системой.
4. Детально изучить сближение скопления Гиады и его шлейфов с Солнечной системой. Получить параметры максимального сближения РЗС Гиады с Солнечной системой. Оценить гравитационный эффект влияния сближения Гиад на малые тела Солнечной системы.

Мы рассматривали следующие скопления:

1. NGC 2158 и King 11 - старые, далекие (~ 3 кпк) от Солнца. В то же время имеющие достаточно много звезд кандидатов с фотометрией и астрометрией Gaia. Данные позволили не только определить основные характеристики и параметры скоплений, но и рассмотреть особенности их движения в пространстве.
2. РЗС, расположенные в окрестностях Солнца ($n \simeq 300$): в процессе движения вокруг центра Галактики РЗС могут сближаться в пространстве как между собой, так и с отдельными звездами, в том числе Солнцем. Поиск таких сближений обнаружил близкое про-

хождение РЗС Гиады и Солнечной системы, особенно интересное с учетом обширных шлейфов Гиад. Оценка гравитационного эффекта сближения Гиад и Солнечной системы позволила выявить изменение элементов орбиты малых тел облака Оорта и возможное появление новых комет в Солнечной системе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уточненные по современным данным кинематические параметры скоплений NGC 2158 и King11: гелиоцентрическая пространственная скорость, минимальное расстояние до Солнца, вероятное время и место рождения скопления, а также период осцилляции по Z-координате.
2. Программный комплекс для расчета сближений звезд и РЗС, позволяющий выявить события имеющие гравитационный эффект на планетную систему.
3. Параметры сближения рассеянных звездных скоплений из каталога MWSC с Солнечной системой: минимальные расстояния сближений с Солнечной системой и соответствующие моменты времени сближений. Создан каталог, содержащий эти параметры.
4. Показано, что все известные на период выполнения работы рассеянные скопления в прошлые эпохи проходили не ближе 60 пк от Солнца и не могли оказывать существенное влияние на Солнечную систему, прежде всего на кометы облака Оорта. Исключением является скопление Гиады.
5. Согласно результатам численных расчетов сближения скопления Гиады с Солнечной системой показано, что приблизительно 1 млн. лет назад центр скопления Гиад прошел на расстоянии менее 25 пк от Солнца. Такое событие тоже не могло внести существенные возмущения в динамику комет облака Оорта. Этот эффект нужно учитывать наряду с другими эффектами. Показано, что звезды шлейфа Гиад проходили значительно ближе (до 6 пк) к Солнцу, чем центр скопления и влияние таких прохождений также нужно учитывать при расчетах изменений элементов орбит комет внешнего облака Оорта.

Научная новизна:

1. Уточнены физические и кинематические параметры скоплений NGC 2158 и King 11 по данным Gaia DR2 и Gaia EDR3.
2. Впервые рассчитаны моменты минимальных сближений рассеянных звездных скоплений с Солнечной системой. Составлен и опубликован каталог сближений РЗС и Солнечной системы.
3. Выполнено оригинальное исследование, в рамках которого впервые показано, что РЗС Гиады проходили около Солнечной системы (на расстоянии ~ 25 пк приблизительно один миллион лет назад. Сделана оценка гравитационного эффекта влияния скопления на кометы внешних частей Солнечной системы. Обнаруженный эффект необходимо учитывать наряду с другими эффектами, например, с влиянием приливных сил Галактики и газопылевых облаков.

Практическая значимость заключается в том, что исследование вносит вклад в понимание кинематики рассеянных звездных скоплений и их взаимодействия с Солнечной системой, уточняя влияние сближений на облако Оорта. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования влияния сближений скоплений на малые тела Солнечной системы, что важно для изучения процессов формирования и эволюции облака Оорта и появления новых комет.

Достоверность обусловлена обсуждением результатов диссертации на научных конференциях и семинарах, а также публикацией их в рецензируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. 48-я студенческая научная конференция "Физика Космоса"(Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 28 января – 01 февраля 2019)
2. "Конкурс молодых учёных ИНАСАН"(ИНАСАН, Москва, 24 октября 2019)
3. 49-я студенческая научная конференция "Физика Космоса"(Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 27 - 31 января 2020)

4. "Конкурс молодых учёных ИНАСАН"(ИНАСАН, Москва, 05 ноября 2020)
5. Конференция "Астрономия и исследование космического пространства"(УрФУ, Екатеринбург, 1 - 5 февраля 2021, онлайн)
6. Конференция "VII Бредихинские чтения"(ИНАСАН, 24-28 мая 2021, онлайн)
7. Всероссийская астрономическая конференция 2021: "Астрономия в эпоху многоканальных исследований"(23-28 августа 2021, онлайн)

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

1. Составлен каталог скоплений, сближавшихся с Солнечной системой.
2. Установлено, что скопление Гиады сближалось с Солнечной системой.
3. Рассчитаны параметры движения скоплений NGC 2158 и King 11.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК [1—4]; также автор принимал участие в работе над 9 статьями [5; 24; 6—12] и 2 тезисами докладов [13; 14].

Содержание работы

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. В главе 1 описаны модели и методы расчетов, используемые в работах. В главе 2 описано исследование физических и кинематических параметров двух выбранных далеких от Солнца РЗС по данным Gaia DR2 и EDR3. В главе 3 исследовано сближение РЗС с Солнцем, в том числе детально рассмотрено скопление Гиады. Полный объем диссертации составляет 119 страниц с 42 рисунками и 27 таблицами. Список литературы содержит 141 наименование.

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, описываются научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Глава 1 посвящена выбору модели гравитационного потенциала Галактики, необходимой для изучения движения звездных скоплений. Основное внимание уделено модели MWPotential2014 [25], которая включает три компонента: балдж, диск и гало. Балдж представлен степенным сферическим потенциалом, диск — потенциалом Миямото-Нагаи [26], а гало — профилем Наварро-Френка-Уайта [27]. Эта модель наилучшим образом воспроизводит кривую вращения Млечного Пути.

Для интегрирования орбит скоплений использован метод Рунге-Кутты 4-го порядка, реализованный в пакете *galpy* [28]. Проведена проверка сохранения энергии системы, которая показала, что изменение энергии остаётся на уровне, не превышающем 10^{-7} на протяжении всего времени интегрирования, что подтверждает точность метода. Также исследовано влияние выбора потенциала Галактики на результаты расчетов. Для этого проведено сравнение модели Млечного Пути MWPotential2014 [28] с добавлением к ней моделей бара [29] и спиральных рукавов Галактики [30]. Выявлено, что для временных промежутков менее 10 млн лет случайные ошибки наблюдений оказывают большее влияние, чем выбор модели потенциала.

В **Главе 2** представлены результаты исследования физических и кинематических параметров двух старых рассеянных скоплений — NGC 2158 и King 11. Используются данные Gaia DR2 и EDR3. Для определения членства звезд в скоплениях применен вероятностный метод на основе диаграмм собственных движений. Исследование движения скоплений вокруг центра Галактики выполнено назад во времени в соответствии с параметрами, определенными в наших исследованиях: возрастом скоплений, собственным движением μ_α , μ_δ , расстоянием d , положение α , δ , а также скорость V_r , рассчитанную с помощью данных Gaia и LAMOST DR5 [31].

Расчеты орбит показали, что King 11 сближался с Солнечной системой на 1.58 кпк около 0.76 млрд лет назад, а NGC 2158 — на 1.5 кпк 0.8 млрд лет назад, рассчитаны предполагаемые места рождения скоплений: для

NGC 2158 — $Z = -0.25 \pm 0.2$ кпк, для King 11 — Z от -0.320 до 0.419 кпк. Также получены оценки различных параметров РЗС (апоцентр и перицентр, эксцентриситет, положение над плоскостью Галактики, компоненты пространственной скорости, период).

Глава 3 посвящена расчётам сближений рассеянных звёздных скоплений с Солнечной системой. Проведён анализ антиапексов ближайших РЗС и афелиев орбит долгопериодических комет. Использован метод LB-диаграмм для сопоставления направлений движения скоплений и комет. Показано, что для ряда объектов наблюдается пространственная корреляция.

Рассмотрены сближения более 100 РЗС с Солнечной системой в интервале 5 млн лет назад. Используются данные каталогов MWSC и Gaia DR2. Для оценки минимального расстояния сближения d_{\min} и времени этого события t_{\min} интегрировались траектории РЗС в потенциале Галактики. Использован разработанный метод поиска сближений на основе численного интегрирования орбит в галактическом потенциале. Показано, что в большинстве случаев $d_{\min} > 60$ пк. Однако, найдено интересное сближение со скоплением Гиады, рассмотренное более детально. Расчёты показали, что ~ 0.87 млн лет назад центр скопления находился на расстоянии $d_{\min} = 24.8$ пк от Солнца. Для оценки влияния ошибок входных параметров применён статистический подход с вариацией входных данных, по результатам которого диапазон возможных значений d_{\min} составляет 24.7–24.9 пк.

Особое внимание уделено звёздам, входящим в состав шлейфов Гиад [21; 22]. Проведено интегрирование орбит этих звёзд по данным каталога Gaia EDR3 [32], в результате которого выявлены близкие сближения со звёздами шлейфов Гиад. Для некоторых звёзд расстояние сближения составило менее 7 пк (рис. 1). Исследован кумулятивный эффект от прохождения звёзд шлейфов Гиад, проведены оценки приращения скорости комет облака Оорта под и проанализирована возможность изменения их орбит.

В **Заключении** описаны основные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

В данной диссертационной работе проведено комплексное исследование кинематики и динамики рассеянных звездных скоплений (РЗС) NGC 2158, King 11 и Гиады, а также их взаимодействия с Солнечной системой. Основное внимание уделено изучению орбитальных параметров скоплений,

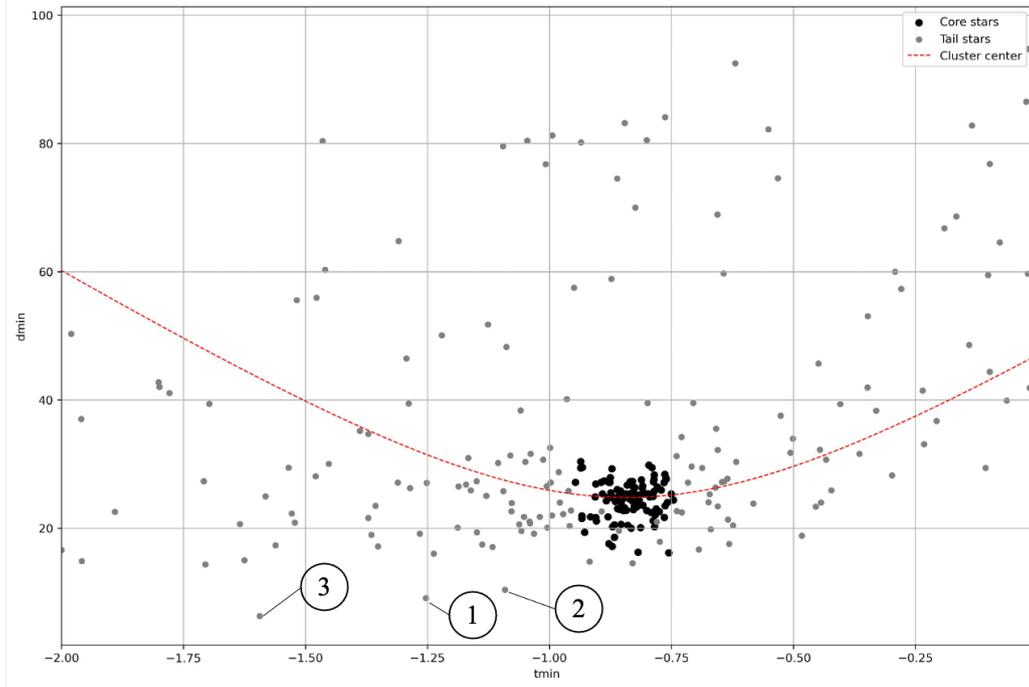


Рис. 1 — Сближения звезд скопления Гиады с Солнечной системой.

Красной линией показано движение центра скопления. Черные точки показывают звезды центра скопления ($r < 10$ пк), серые - звезды шлейфов.

Отмечены звезды с самым малым значением d_{min} : 1) Gaia DR2 3326367237777804544 $d_{min} = 2.11$ пк, 2) Gaia DR2 3131255252997637632 $d_{min} = 4.04$ пк и 3) Gaia DR2 3328617079087341440 $d_{min} = 6.33$ пк.

их места рождения в галактическом диске, а также влиянию сближений РЗС с Солнечной системой на динамику малых тел во внешних частях Солнечной системы, в частности, на облако Оорта. В работе использованы данные космического аппарата *Gaia*, что позволило получить высокоточные астрометрические и фотометрические данные для анализа.

Основные результаты работы:

1. Уточнены параметры скоплений NGC 2158 и King 11:

- Для скопления NGC 2158 получены следующие параметры: возраст $\log(t) = 9.38 \pm 0.04$ (t в млрд лет), металличность $Z = 0.004$, расстояние от Солнца 4.69 ± 0.22 кпк. Скопление относится к старому диску Галактики.
- Для скопления King 11 определены: возраст 3.63 ± 0.42 млрд лет, содержание тяжелых элементов $Z = 0.011$, расстояние от Солнца 3.33 ± 0.15 кпк.

- Определены орбитальные параметры скоплений, включая апоцентр, перицентр, эксцентриситет и максимальное отклонение от галактической плоскости. Для NGC 2158 апоцентр составляет 12.8 ± 0.03 кпк, перицентр 11.1 ± 0.05 кпк, эксцентриситет 0.07 ± 0.003 . Для King 11 апоцентр 13.80 ± 0.49 кпк, перицентр 10.10 ± 0.01 кпк, эксцентриситет 0.15 ± 0.02 .

2. Сближения РЗС с Солнечной системой:

- Проведен анализ сближений РЗС с Солнечной системой за последние 5 млн лет. Для скопления Гиады (Melotte 25) установлено, что оно сближалось с Солнечной системой на расстояние 24.8 ± 0.15 пк приблизительно 0.87 млн лет назад. Отдельные звезды скопления могли приближаться к Солнцу на расстояние до 2.11 пк.
- Рассчитаны возмущения орбит комет облака Оорта под влиянием гравитационного воздействия скоплений. Для Гиад максимальное приращение скорости комет составило 0.116 м/с, что может привести к значительным изменениям орбит комет, находящихся в афелии.

3. Влияние сближений на внешние части облака Оорта:

- Показано, что сближения РЗС с Солнечной системой могут оказывать влияние на динамику комет облака Оорта. В частности, сближение Гиад могло привести к миграции комет из внешних областей Солнечной системы к орбите Нептуна.
- Обнаружено, что положения антиапексов скоплений и афелиев долгопериодических комет могут совпадать, что указывает на возможное влияние скоплений на появление новых комет.

Практическая значимость:

- Полученные результаты могут быть использованы для уточнения моделей галактической эволюции и динамики звездных скоплений.
- Результаты работы могут быть применены для прогнозирования влияния сближений с РЗС на динамику малых тел Солнечной систе-

мы, что важно для понимания процессов формирования и эволюции облака Оорта, появления наблюдаемых комет.

Перспективы дальнейших исследований:

- **Изучение кинематики РЗС:** Современные исследования кинематики рассеянных звездных скоплений активно развиваются благодаря данным космического аппарата *Gaia* [17]. Эти данные позволяют уточнить орбитальные параметры скоплений, их возраст, металличность и динамическую эволюцию. В частности, работы [33; 34] демонстрируют, как точные измерения собственных движений и параллаксов звезд в скоплениях помогают понять их происхождение и миграцию в галактическом диске. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния галактических приливных сил и взаимодействий с другими структурами, такими как спиральные рукава и гигантские молекулярные облака, на эволюцию РЗС [35]. Мы искали сближение в пространстве между звездным скоплением и внесолнечной планетной системой в прошлые эпохи. Нашли родительскую звезду TOI-2796 - кандидата на такое сближение для скопления NGC 1977, оценили параметры этого сближения [12].
- **Изучение межзвездных объектов:** Открытие межзвездных объектов, таких как астероид 1I/Оумуамуа [36] и комета 2I/Борисова [37], стимулировало интерес к изучению их происхождения и динамики. Современные исследования показывают, что такие объекты могут быть связаны с выбросами в результате их сближений с массивными объектами, такими как звездные скопления [38]. Дальнейшие наблюдения с помощью телескопов нового поколения, таких как *LSST* (Large Synoptic Survey Telescope) [39], позволят обнаружить больше межзвездных объектов и изучить их свойства, что может пролить свет на процессы формирования планетных систем в других звездных системах.
- **Изучение сближений различных космических объектов:** Влияние сближений звезд и скоплений с Солнечной системой на динамику облака Оорта остается важной темой исследований. Работы [40], [41] показывают, что такие сближения могут вызывать возмущения в орбитах комет и способствовать их миграции во внутренние

области Солнечной системы. Современные методы моделирования, основанные на данных *Gaia*, позволяют более точно оценить частоту и последствия таких событий [42]. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение кумулятивного эффекта от сближений с несколькими объектами, а также на анализ влияния галактических приливных сил на облако Оорта [43].

В заключение можно отметить, что проведенное исследование вносит определенный вклад в понимание динамики звездных скоплений и их взаимодействия с Солнечной системой. Полученные результаты открывают новые перспективы для дальнейших исследований в области галактической астрономии и динамики малых тел Солнечной системы.

Благодарности: хочется выразить огромную благодарность своему научному руководителю за ценные замечания, помощь и поддержку. Также хочется поблагодарить Шустова Бориса Михайловича, Малкова Олега Юрьевича, Баркова Максима Владимировича, Пискунова Анатолия Эдуардовича, Самуся Николая Николаевича, Емельяненко Вячеслава Васильевича, Тутукова Александра Васильевича, Чупину Наталию Викторовну и Постникову Екатерину Сергеевну за обсуждения и ценные советы.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Sizova M. D., et al.* Solar System Encounters with Open Star Clusters // *Astronomy Reports*. — 2020. — Aug. — Vol. 64, no. 8. — P. 711–721. — DOI: [10.1134/S106377292009005X](https://doi.org/10.1134/S106377292009005X).
2. *Sariya D. P., et al.* A Gaia-based Photometric and Kinematic Analysis of the Old Open Cluster King 11 // *The Astronomical Journal*. — 2021. — Окт. — Т. 162, № 4. — С. 146. — DOI: [10.3847/1538-3881/ac09e7](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac09e7). — arXiv: [2106.04783](https://arxiv.org/abs/2106.04783) [astro-ph.GA].
3. *Sariya D. P., et al.* A Comprehensive Analysis of NGC 2158 in the Gaia Era: Photometric Parameters, Apex, and Orbit // *The Astronomical Journal*. — 2021. — Mar. — Vol. 161, no. 3. — P. 101. — DOI: [10.3847/1538-3881/abd31d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd31d). — arXiv: [2012.06342](https://arxiv.org/abs/2012.06342) [astro-ph.GA].

4. *Vereshchagin S. V., Emel'yanenko V. V., Sizova M. D.* Approach of the Hyades star cluster to the Solar system // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — ИЮНЬ. — Т. 513, № 2. — С. 2958—2964. — DOI: [10.1093/mnras/stac1024](https://doi.org/10.1093/mnras/stac1024).
5. *Vereshchagin S. V., Sizova M. D., Shustov B. M.* Binary and double star clusters // INASAN Science Reports. — 2020. — АВГ. — Т. 5. — С. 85—88. — DOI: [10.26087/INASAN.2020.5.3.001](https://doi.org/10.26087/INASAN.2020.5.3.001).
6. *Sizova M. D., Pavlyuchenkov Y. N., Naroenkov S. A.* Modeling of exocomet orbits in β Pictoris system // INASAN Science Reports. — 2019. — ОКТ. — Т. 4. — С. 179—183. — DOI: [10.26087/INASAN.2019.4.2.028](https://doi.org/10.26087/INASAN.2019.4.2.028).
7. *Puzin V. B., Sizova M. D.* Spectral observations of stars with exocomet activity // INASAN Science Reports. — 2019. — ОКТ. — Т. 4. — С. 172—178. — DOI: [10.26087/INASAN.2019.4.2.027](https://doi.org/10.26087/INASAN.2019.4.2.027).
8. *Tutukov A. V., Sizova M. D., Vereshchagin S. V.* Time Evolution of a Cometary Spear of the Sun // Astronomy Reports. — 2021. — АПР. — Т. 65, № 4. — С. 305—311. — DOI: [10.1134/S1063772921040089](https://doi.org/10.1134/S1063772921040089).
9. *Tutukov A. V., Vereshchagin S. V., Sizova M. D.* Destruction of Galaxies as a Cause of the Appearance of Stellar Streams // Astronomy Reports. — 2021. — НОЯБ. — Т. 65, № 11. — С. 1085—1101. — DOI: [10.1134/S106377292111007X](https://doi.org/10.1134/S106377292111007X).
10. *Tutukov A. V., Sizova M. D., Vereshchagin S. V.* Evolution of Comets // Astronomy Reports. — 2021. — СЕНТ. — Т. 65, № 9. — С. 884—896. — DOI: [10.1134/S1063772921090079](https://doi.org/10.1134/S1063772921090079).
11. *Tutukov A. V., Sizova M. D., Vereshchagin S. V.* Formation of Stellar Streams Due to the Decay of Star Clusters, OB Associations, and Galaxy Satellites // Astronomy Reports. — 2020. — ОКТ. — Т. 64, № 10. — С. 827—838. — DOI: [10.1134/S106377292010008X](https://doi.org/10.1134/S106377292010008X).
12. Approach of the NGC1977 Star Cluster to the TOI-2796 Host Star / H. Y. Wakjira [и др.] // Astronomy Reports. — 2024. — ОКТ. — Т. 68, № 10. — С. 967—977. — DOI: [10.1134/S1063772924700835](https://doi.org/10.1134/S1063772924700835). — arXiv: [2310.14193](https://arxiv.org/abs/2310.14193) [astro-ph.GA].

13. *Sizova M. D., Vereshchagin S. V., et al.* Star Clusters, Planets, Asteroids and Comets in the Light of Big Data // International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. — 2021. — URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3036/paper16.pdf>.
14. *Sizova M. D., Tutukov A. V., Vereshchagin S. V.* Stellar comet spear // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 2021. — Дек. — Т. 51, № 3. — С. 270—279. — DOI: [10.31577/caosp.2021.51.3.270](https://doi.org/10.31577/caosp.2021.51.3.270).

Список литературы

15. *Hunt E. L., Reffert S.* Improving the open cluster census. II. An all-sky cluster catalogue with Gaia DR3 // Astronomy Astrophysics. — 2023. — Май. — Т. 673. — A114. — DOI: [10.1051/0004-6361/202346285](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346285). — arXiv: [2303.13424](https://arxiv.org/abs/2303.13424) [astro-ph.GA].
16. *Campello R., Moulavi D., Sander J.* Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates //. Т. 7819. — 04.2013. — С. 160—172. — ISBN 978-3-642-37455-5. — DOI: [10.1007/978-3-642-37456-2_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37456-2_14).
17. *Gaia Collaboration, et al.* Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties // Astronomy Astrophysics. — 2021. — Май. — Т. 649. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/202039657](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039657). — arXiv: [2012.01533](https://arxiv.org/abs/2012.01533) [astro-ph.GA].
18. *Kharchenko N. V., Piskunov A. E., et al.* Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters // Astronomy and Astrophysics. — 2013. — Окт. — Т. 558. — A53. — DOI: [10.1051/0004-6361/201322302](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322302). — arXiv: [1308.5822](https://arxiv.org/abs/1308.5822) [astro-ph.GA].
19. *Röser S., Schilbach E.* A census of the nearby Pisces-Eridanus stellar stream. Commonalities with and disparities from the Pleiades // Astronomy Astrophysics. — 2020. — Июнь. — Т. 638. — A9. — DOI: [10.1051/0004-6361/202037691](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037691). — arXiv: [2002.03610](https://arxiv.org/abs/2002.03610) [astro-ph.SR].

20. *Danilov V. M., Dorogavtseva L. V.* Timescales for mechanisms for the dynamical evolution of open star clusters // *Astronomy Reports*. — 2008. — ИЮНЬ. — Т. 52, № 6. — С. 467—478. — DOI: [10.1134/S1063772908060048](https://doi.org/10.1134/S1063772908060048).
21. *Röser S., Schilbach E., Goldman B.* Hyades tidal tails revealed by Gaia DR2 // *Astronomy Astrophysics*. — 2019. — ЯНВ. — Т. 621. — С. L2. — DOI: [10.1051/0004-6361/201834608](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834608). — arXiv: [1811.03845 \[astro-ph.SR\]](https://arxiv.org/abs/1811.03845).
22. *Meingast S., Alves J.* VizieR Online Data Catalog: Hyades tidal tails with Gaia DR2 (Meingast+, 2019) // *VizieR Online Data Catalog*. — 2019. — ЯНВ. — J/A+A/621/L3.
23. *Jerabkova T., Boffin H. M. J., et al.* The 800 pc long tidal tails of the Hyades star cluster. Possible discovery of candidate epicyclic overdensities from an open star cluster // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Март. — Т. 647. — A137. — DOI: [10.1051/0004-6361/202039949](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039949). — arXiv: [2103.12080 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/2103.12080).
24. *Shustov B. M., Vereshchagin S. V., Sizova M. D.* On a stochastic method for evaluating the approach frequency of stars and Solar system // *INASAN Science Reports*. — 2020. — АБР. — Т. 5. — С. 89—93. — DOI: [10.26087/INASAN.2020.5.3.002](https://doi.org/10.26087/INASAN.2020.5.3.002).
25. *Bovy J., Rix H.-W.* A Direct Dynamical Measurement of the Milky Way’s Disk Surface Density Profile, Disk Scale Length, and Dark Matter Profile at $4 \text{ kpc} < \sim R < \sim 9 \text{ kpc}$ // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Дек. — Т. 779, № 2. — С. 115. — DOI: [10.1088/0004-637X/779/2/115](https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/2/115). — arXiv: [1309.0809 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/1309.0809).
26. *Miyamoto M., Nagai R.* Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 1975. — ЯНВ. — Т. 27. — С. 533—543.
27. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* The Structure of Cold Dark Matter Halos // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — Май. — Т. 462. — С. 563. — DOI: [10.1086/177173](https://doi.org/10.1086/177173). — arXiv: [astro-ph/9508025 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9508025).
28. *Bovy J.* galpy: A python Library for Galactic Dynamics // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2015. — ФЕВР. — Т. 216, № 2. — С. 29. — DOI: [10.1088/0067-0049/216/2/29](https://doi.org/10.1088/0067-0049/216/2/29). — arXiv: [1412.3451 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/1412.3451).

29. *Dehnen W.* The Effect of the Outer Lindblad Resonance of the Galactic Bar on the Local Stellar Velocity Distribution // *Astronomical Journal*. — 2000. — Февр. — Т. 119, № 2. — С. 800—812. — DOI: [10.1086/301226](https://doi.org/10.1086/301226). — arXiv: [astro-ph/9911161](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9911161) [[astro-ph](#)].
30. *Cox D. P., Gómez G. C.* Analytical Expressions for Spiral Arm Gravitational Potential and Density // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2002. — Окт. — Т. 142, № 2. — С. 261—267. — DOI: [10.1086/341946](https://doi.org/10.1086/341946). — arXiv: [astro-ph/0207635](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207635) [[astro-ph](#)].
31. *Luo A. L., et al.* VizieR Online Data Catalog: LAMOST DR5 catalogs (Luo+, 2019). — 09.2019. — VizieR On-line Data Catalog: V/164. Originally published in: 2019RAA..in.prep..L.
32. *Lodieu N., Smart R. L., et al.* VizieR Online Data Catalog: A 3D view of the Hyades population (Lodieu+, 2019) // *VizieR Online Data Catalog*. — 2019. — Янв. — J/A+A/623/A35.
33. *Cantat-Gaudin T., et al.* A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Окт. — Т. 618. — A93. — DOI: [10.1051/0004-6361/201833476](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833476). — arXiv: [1805.08726](https://arxiv.org/abs/1805.08726) [[astro-ph.GA](#)].
34. *Cantat-Gaudin T., Anders F., et al.* Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters // *Astronomy and Astrophysics*. — 2020. — Авг. — Т. 640. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/202038192](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038192). — arXiv: [2004.07274](https://arxiv.org/abs/2004.07274) [[astro-ph.GA](#)].
35. *Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gieles M.* Young Massive Star Clusters // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — Сент. — Т. 48. — С. 431—493. — DOI: [10.1146/annurev-astro-081309-130834](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130834). — arXiv: [1002.1961](https://arxiv.org/abs/1002.1961) [[astro-ph.GA](#)].
36. *Meech K. J., Weryk R., et al.* A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid // *Nature*. — 2017. — Дек. — Т. 552, № 7685. — С. 378—381. — DOI: [10.1038/nature25020](https://doi.org/10.1038/nature25020).
37. *Guzik P., Drahus M., et al.* Initial characterization of interstellar comet 2I/Borisov // *Nature Astronomy*. — 2020. — Янв. — Т. 4. — С. 53—

57. — DOI: [10 . 1038 / s41550 - 019 - 0931 - 8](https://doi.org/10.1038/s41550-019-0931-8). — arXiv: [1909 . 05851](https://arxiv.org/abs/1909.05851) [[astro-ph.EP](#)].
38. *Moro-Martín A.* Could 1I/'Oumuamua be an Icy Fractal Aggregate? // The Astrophysical Journal Letters. — 2019. — Февр. — Т. 872, № 2. — С. L32. — DOI: [10.3847/2041-8213/ab05df](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab05df). — arXiv: [1902.04100](https://arxiv.org/abs/1902.04100) [[astro-ph.EP](#)].
39. *Ivezić Ž., Kahn S. M., et al.* LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products // The Astrophysical Journal. — 2019. — Март. — Т. 873, № 2. — С. 111. — DOI: [10.3847/1538-4357/ab042c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab042c). — arXiv: [0805.2366](https://arxiv.org/abs/0805.2366) [[astro-ph](#)].
40. *Dybczyński P. A., Leto G., et al.* The simulation of the outer Oort cloud formation. The first giga-year of the evolution // Astronomy Astrophysics. — 2008. — Август. — Т. 487, № 1. — С. 345—355. — DOI: [10.1051/0004-6361:20078686](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20078686).
41. *Bailer-Jones C. A. L., Rybizki, et al.* Estimating Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2 // Astronomical Journal. — 2018. — Август. — Т. 156, № 2. — С. 58. — DOI: [10.3847/1538-3881/aacb21](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aacb21). — arXiv: [1804.10121](https://arxiv.org/abs/1804.10121) [[astro-ph.SR](#)].
42. *Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., et al.* 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. — DOI: [10.3847/1538-3881/abd806](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd806). — arXiv: [2012.05220](https://arxiv.org/abs/2012.05220) [[astro-ph.SR](#)].
43. *Fouchard M., Rickman H., et al.* On the present shape of the Oort cloud and the flux of ;new; comets // Icarus. — 2017. — Август. — Т. 292. — С. 218—233. — DOI: [10.1016/j.icarus.2017.01.013](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.01.013).