



Астрономическое
образование

2026, № 2

Учебно- исследовательская деятельность

Ключевые слова:

учебное исследование, звёздная динамика, рассеянные звёздные скопления, массовая сегрегация, минимальное остовное дерево

Сокращения:

MST — Minimum Spanning Tree, минимальное остовное дерево;
RA — Right Ascension, прямое восхождение;
DEC — Declination, склонение;
IMF — Initial Mass Function, начальная функция масс;
МНК — метод наименьших квадратов

*rudomanov.ma@phystech.edu

Массовая сегрегация в рассеянных звёздных скоплениях

М. А. Рудоманов^{*1}, И. И. Булыгин²

¹Московский физико-технический институт

²Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Аннотация

В работе представлен школьный учебно-исследовательский проект по астрофизике, выполненный учащимся 10 класса. Показана целесообразность ведения проектной деятельности старшими школьниками на продвинутом исследовательском уровне, обозначены инструменты коммуникации и принцип проектирования работы учащегося. Исследовательская часть посвящена оценке массовой сегрегации в 12 рассеянных звёздных скоплениях по данным SAI Open Clusters Catalog. Для количественной оценки сегрегации используется метод минимального остовного дерева (MST), основанный на сравнении длины MST для выборки наиболее массивных звёзд с распределением длин MST для случайных подвыборок того же размера. Массы звёзд оцениваются по фотометрии через приближённое соотношение масса — светимость, а простая модель изменения числа звёзд строится на основе начальной функции масс. Для каждого скопления также оценивается характерное время релаксации по формулам звёздной динамики. Полученные результаты указывают на возможную связь между динамическим возрастом скопления и величиной Δ_{MSR} , однако из-за малой выборки, приближённого определения масс и упрощённого отбора членов скоплений выводы следует рассматривать как качественную учебно-исследовательскую оценку.

Исследовательский проект выполнен М.А. Рудомановым под научным руководством И.И. Булыгина на кафедре астрономии Школы Центра педагогического мастерства (г. Москва) в 2023/2024 учебном году.

1. Введение

Выполнение и защита индивидуальных, в том числе исследовательских, проектов являются обязательными для учащихся по итогам обучения в старшей школе. Это требование, хотя и является обязательной частью образовательной программы, вызывает вопрос о том, как сделать такую работу содержательной, а не формальной. Особенно заметна эта проблема в работе с участниками всероссийских олимпиад по естественно-научным и техническим предметам, для которых стандартный школьный уровень часто оказывается недостаточно сложным и потому слабо мотивирующим.

Очевидно, что такой учащийся в полной мере владеет к 10 классу материалом профильного предмета на уровне школьной программы. В то же время активное и успешное участие в олимпиадах говорит об амбициях, способности находиться в состоянии неопределённости и выходить из него с помощью быстрого освоения новых инструментов. В статье обсуждается, как можно адаптировать формат школьного исследовательского проекта под запросы таких учащихся, как сохранить баланс между доступностью задачи, новизной исследовательского подхода и необходимостью освоения инструментария.

Содержание статьи организовано следующим образом. В разделе 2 приведены аргументы в пользу работы со старшими школьниками на продвинутом исследова-

Поступило в редакцию	24.05.2026
После доработки	30.05.2026
В печать	14.06.2026
Опубликовано	12.08.2026

ISSN 3033-7917
journal.astroedu.ru

тельском уровне, а также способ постановки достаточно интересной и технически выполнимой задачи. В разделе 3 приведены используемые проектные и коммуникативные инструменты и форматы, необходимые для быстрого обучения учащегося проектным и исследовательским навыкам. Последующие разделы представляют собой непосредственное содержание выполненного исследовательского проекта.

2. Цели школьного проекта. Выбор темы

С точки зрения авторов, школьная проектная деятельность преследует несколько целей одновременно:

- **формирование учащегося как личности** в процессе преодоления трудностей и освоения новых видов деятельности;
- **профессиональная ориентация** учащегося через пробное действие в домене выбранной им профильной (олимпиадной) специализации;
- **развитие системного мышления** при работе с задачей, которую невозможно содержательно выполнить в последний момент.

Для достижения этих целей научному руководителю недостаточно просто предложить тему. Необходимо заранее организовать пространство совместной работы: подобрать исходные материалы, определить формат общения, задать ожидаемый темп работы и показать учащемуся способы исследовательского рассуждения.

При решении этой задачи было решено использовать следующие *эвристические принципы выбора темы*:

- Тема должна соответствовать областям интересов учащегося. В данном случае такими областями были астрономия и анализ данных.
- Тема проекта не должна подразумевать слишком сложной математической составляющей, для освоения которой необходим один или несколько университетских курсов. Другими словами, если учащийся не знает, как решать дифференциальные уравнения, а в проекте их необходимо решать, такая тема не подходит. В то же время, если учащийся интересуется анализом данных с помощью Python, ему необходимо предоставить возможность практики с этим инструментом. Таким образом обеспечивается техническая реализуемость проекта силами учащегося.
- Тема проекта должна быть дидактически адекватна школьному уровню физики. Нет смысла предлагать школьный проект, например, по подсчёту сечений рассеяния частиц. Существенным преимуществом является

наличие достаточно адекватной, понятной учащемуся физической аналогии исследуемого астрономического феномена. В таком случае учащийся частично оказывается в области, где он может делать самостоятельные ходы и выдвигать гипотезы, опираясь на аналогии с более простыми физическими моделями. Например, в описываемом проекте было выбрано исследование сегрегации в звёздных скоплениях как явления, имеющего простую физическую аналогию: согласно закону Архимеда менее плотное тело должно всплывать в более плотной среде.

Аналогично был сформулирован набор *принципов организации совместной работы*:

- Проект должен быть технически реализуем за время его формального выполнения. При минимальных усилиях по изучению новых предлагаемых инструментов проект должен быть выполнен силами учащегося. Для этого был предусмотрен план-минимум, приводящий к новым результатам, которые могут быть оценены положительно, а также дальнейшие шаги, при выполнении которых учащийся может получить более содержательные научные результаты.
- Экспертная литература по исследуемому в проекте феномену должна быть максимально разнообразной и охватывать различные области научной деятельности. Так, при выборе проекта по динамике звёзд в звёздных скоплениях логично предоставить классические учебники по галактической динамике. Вместе с тем полезно предложить набор классических и современных статей, университетских курсов, а также инструкцию по поиску всех упомянутых видов материалов.
- Наравне с литературой необходимо предоставить инструменты и исходные данные, достаточно простые для понимания учащимся, но действительно используемые в реальной научной деятельности. В данном проекте такими элементами стали открытый каталог звёздных скоплений, обработка данных на Python и модели, не требующие для их применения использования большого объёма университетской математики.

3. Методика сопровождения проекта

При сопровождении школьного проекта научный руководитель фактически работает в гибридном режиме: с одной стороны, задача должна сохранять исследовательскую неопределённость, с другой — учащемуся нужна методическая опора, близкая к структуре лабораторной работы. Поэтому в школьной проектной работе

целесообразно использовать элементы университетского лабораторного формата:

- подготовить методический материал для проекта с планом его выполнения (допускающим вариативность), инструментами и литературой для изучения;
- по итогам изучения литературы и инструментов осуществить *допуск* к работе над проектом, то есть оценить, насколько учащийся владеет необходимым понятийным аппаратом и инструментарием.

Кроме того, формат взаимодействия целесообразно заимствовать из реальной научной деятельности:

- работать спринтами по 1–2 недели, придавая проектной работе регулярность и приучая школьника работать систематически, а не в импульсном режиме; явно фиксировать промежуточные результаты;
- использовать коллаборативные инструменты для общения (редакторы документов, системы видеоконференцсвязи), совместной работы (среды программирования и подготовки научных отчётов в $\text{\LaTeX}$).

В процессе работы использовались все упомянутые принципы и инструменты. Формат взаимодействия был задан с помощью проектного документа. В нём были приведены план работы, ссылки на литературу с конкретными разделами, необходимыми для изучения. Также было проконтролировано, что учащийся освоил следующие инструменты и понятия:

- понятие сегрегации масс, её наблюдаемые проявления;
- понятие начальной функции масс;
- характерные временные масштабы для задач звёздной динамики;
- метод MST как способ количественной оценки степени массовой сегрегации, его реализацию с помощью библиотеки SciPy в Python;
- методы построения линейной регрессии по данным с ошибками с помощью Python;
- понятия звёздной величины, звёздной эволюции.

Результат работы научный руководитель оценивает положительно, поскольку учащийся смог применить доступные ему физические модели для решения актуальной и новой исследовательской задачи. В ходе проекта активно использовались профильная литература и проектные инструменты, которые используют в реальных научных группах при обучении студентов. Опыт проекта показывает, что участник всероссийских олимпиад, ещё не являясь студентом технического вуза,

может выполнять исследовательскую работу на уровне студента младших курсов. Основное различие заключается в уровне технической подготовки, тогда как сама логика исследования может быть освоена школьником при задании правильных рамок проекта и последовательной работе с его мотивацией.

4. Исследовательская часть проекта: введение

Сегрегация в звёздных скоплениях является одним из важных аспектов изучения формирования и эволюции звёздных систем. Это процесс, в котором звёзды в скоплении распределяются в пространстве неравномерно в зависимости от их массы и других параметров. В данной работе мы рассмотрим данное явление с разных сторон, а также обсудим его последствия для дальнейшей эволюции звёздных систем.

Параметры скоплений (расстояния, возрасты, угловые размеры) взяты из каталога SAI OCL [1; 2]; для независимого сравнения параметров рассеянных скоплений см. также каталог MWSC [3]. Фотометрические данные использованы в виде VOTable-файлов SAI OCL. Цель работы состоит в том, чтобы проверить, можно ли на этих каталожных данных обнаружить качественную связь между динамическим возрастом скопления и выраженностью массовой сегрегации.

5. Массовая сегрегация и MST

В качестве рабочего определения будем считать, что массовая сегрегация наблюдается, если наиболее массивные звёзды распределены в скоплении иначе, чем звёзды меньших масс, и, в частности, сильнее сконцентрированы. Такое определение соответствует подходу, использованному в работе [4].

Мы используем метод количественной оценки массовой сегрегации, основанный на сравнении длины минимального остовного дерева (MST) для выборки массивных звёзд с длинами MST для случайных подвыборок того же размера. Если массивные звёзды действительно более сконцентрированы, длина их MST должна быть меньше средней длины MST случайных подвыборок [4]. Метод применяется в двумерной проекции на картинную плоскость, поскольку для звёзд выборки нет достаточно точной индивидуальной информации о координате вдоль луча зрения.

Минимальное остовное дерево выборки точек — это набор рёбер, соединяющий все точки без замкнутых контуров и имеющий минимальную суммарную длину. Суммарная длина MST при заданной метрике определе-

на однозначно, хотя само дерево может быть неединственным. Например, для трёх точек, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, существует три возможных MST: каждое из них получается удалением одного из рёбер треугольника. При этом суммарные длины всех таких деревьев одинаковы.

Задача нахождения MST может решаться алгоритмом Прима: он находит минимальное остовное дерево, начиная с некоторой вершины и на каждом шаге добавляя к дереву ребро с наименьшим весом, соединяющее дерево с вершиной, ещё не принадлежащей дереву. Асимптотическая сложность реализации алгоритма составляет $O(E \lg V)$, где E — количество рёбер в графе, а V — количество вершин [5]. В данном исследовании использована стандартная реализация MST из библиотеки SciPy для полной матрицы евклидовых расстояний в плоскости RA — DEC.

6. Количественная оценка сегрегации масс

Для каждого скопления выбирается N_{MST} наиболее массивных звёзд, после чего длина их MST сравнивается со средним значением длин MST для случайных подвыборок из N_{MST} звёзд. Если длина MST массивных звёзд существенно меньше средней случайной длины, это указывает на более компактное распределение массивных звёзд, то есть на массовую сегрегацию. Отношение средней случайной длины ($\langle l_{\text{rand}} \rangle \pm \sigma_{\text{rand}}$) к длине MST массивных звёзд l_{massive} задаёт параметр массовой сегрегации:

$$\Lambda_{\text{MSR}} = \frac{\langle l_{\text{rand}} \rangle}{l_{\text{massive}}} \pm \frac{\sigma_{\text{rand}}}{l_{\text{massive}}}. \quad (1)$$

Значение $\Lambda_{\text{MSR}} \approx 1$ означает, что массивные звёзды распределены примерно так же, как остальные звёзды. Значения $\Lambda_{\text{MSR}} \gg 1$ указывают на массовую сегрегацию, а значения параметра существенно меньше единицы — на обратную массовую сегрегацию, то есть на более широкое распределение массивных звёзд.

В расчётах для каждого скопления использовалось 500 случайных подвыборок, что соответствует рекомендациям Allison et al. для сглаживания случайных флуктуаций [4].

Видимые звёздные величины, требуемые для определения светимости, указаны в каталоге. При этом мы не учитываем межзвёздное поглощение, болометрические поправки, наличие двойных звёзд и различия эволюционных стадий.

Массу звёзд мы определяем из фотометрии по приближённому соотношению масса — светимость для звёзд главной последовательности [6]:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \begin{cases} 0.23(M/M_{\odot})^{2.3}, & 0.01 \leq M/M_{\odot} < 0.43; \\ (M/M_{\odot})^4, & 0.43 \leq M/M_{\odot} < 2; \\ 1.5(M/M_{\odot})^{3.5}, & 2 \leq M/M_{\odot} < 20; \\ 3200(M/M_{\odot}), & 20 \leq M/M_{\odot} < 100. \end{cases} \quad (2)$$

Полученные массы следует понимать как достаточно грубую рабочую оценку.

Массивными звёздами в работе считаются объекты с оценкой массы больше $2M_{\odot}$.

Явные пространственные выбросы исключались 3σ -отсечением по RA и DEC относительно медианы координат. Поскольку работа в первую очередь направлена на качественную оценку связи между динамической эволюцией скопления и параметром массовой сегрегации, такой отбор достаточен, но не заменяет строгого отбора физических членов скопления по собственным движениям, параллаксам и вероятностям членства.

Пример распределения звёзд и массивных звёзд скопления показан на рис. 1. Значения N_{MST} для различных скоплений приведены в таблице 1.

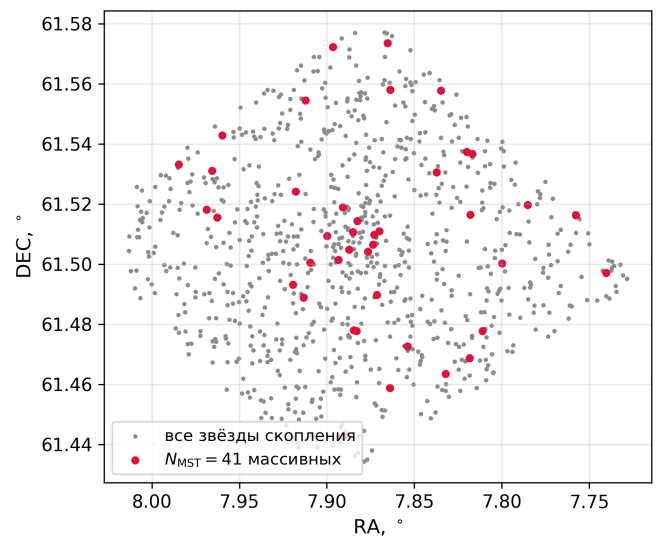


Рис. 1. Распределение звёзд скопления NGC 136 на плоскости RA — DEC. Красными точками выделены $N_{\text{MST}} = 41$ массивных звёзд, использованных для вычисления Λ_{MSR}

Таблица 1. Параметры скоплений, использующиеся в данной работе, и результаты расчётов параметра массовой сегрегации

Скопление	Berkeley 96	Berkeley 97	King 12	King 13	King 18	King 19
N_{visual}	1235	888	706	1114	806	413
D , pc	3180	2410	2490	2960	3010	2630
ρ , arcmin	3	4	5	10	8	7
$\lg T_{\text{real}}$	7.60	8.40	7.85	8.85	8.10	8.75
N_{MST}	15	29	20	12	20	10
Δ_{MSR}	1.13 ± 0.12	1.26 ± 0.09	1.37 ± 0.12	1.09 ± 0.14	1.29 ± 0.11	1.60 ± 0.24
Скопление	King 20	NGC 136	NGC 7245	NGC 7261	NGC 7296	NGC 7788
N_{visual}	518	874	1304	782	808	777
D , pc	1750	5220	3390	2830	2450	2750
ρ , arcmin	10	4	7	7	8	4
$\lg T_{\text{real}}$	8.20	8.40	8.50	8.20	8.45	8.20
N_{MST}	5	41	42	24	24	16
Δ_{MSR}	1.28 ± 0.30	1.05 ± 0.06	0.99 ± 0.05	1.03 ± 0.08	1.03 ± 0.07	1.38 ± 0.14

7. Модель эволюции звёзд скопления

В работе используется кусочно-степенная начальная функция масс (IMF) [7; 8]:

$$\xi(m) = \begin{cases} (m/m_{\odot})^{-0.3}, & 0.01 \leq m/m_{\odot} < 0.08; \\ 0.08(m/m_{\odot})^{-1.3}, & 0.08 \leq m/m_{\odot} < 0.5; \\ 0.04(m/m_{\odot})^{-2.3}, & 0.5 \leq m/m_{\odot} < 1; \\ 0.04(m/m_{\odot})^{-2.7}, & 1 \leq m/m_{\odot} < 100. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\xi(m) \equiv dN/dm$. С учётом (2), используя оценку времени жизни на главной последовательности $T \propto m/L$ и соотношение $L \propto m^x$, получаем непрерывную кусочно-степенную аппроксимацию времени жизни:

$$\frac{T}{T_{\odot}} = \left(\frac{m}{m_{\odot}} \right)^{-(x-1)} \approx \quad (4)$$

$$\approx \begin{cases} 4.199 \cdot (m/m_{\odot})^{-1.3}, & 0.01 \leq m/m_{\odot} < 0.43; \\ (m/m_{\odot})^{-3}, & 0.43 \leq m/m_{\odot} < 2; \\ 0.707(m/m_{\odot})^{-2.5}, & 2 \leq m/m_{\odot} < 20; \\ 0.0004, & 20 \leq m/m_{\odot} < 100. \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{m}{m_{\odot}} \approx \begin{cases} 20 \dots 100, & T/T_{\odot} = 0.0004; \\ (1.4(T/T_{\odot}))^{-0.4}, & 0.0004 < T/T_{\odot} \leq 0.125; \\ (T/T_{\odot})^{-1/3}, & 0.125 < T/T_{\odot} \leq 12.6; \\ (0.24(T/T_{\odot}))^{-0.77}, & 12.6 < T/T_{\odot} \leq 1670. \end{cases} \quad (6)$$

Количество звёзд в скоплении N в настоящий момент времени связано с количеством звёзд N_0 в начальный момент времени соотношением (рис. 2):

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\int_{0.01m_{\odot}}^{m_0} \xi(m) dm}{\int_{0.01m_{\odot}}^{100m_{\odot}} \xi(m) dm}, \quad (7)$$

где $m_0 = m(T)$ соответствует возрасту скопления T .

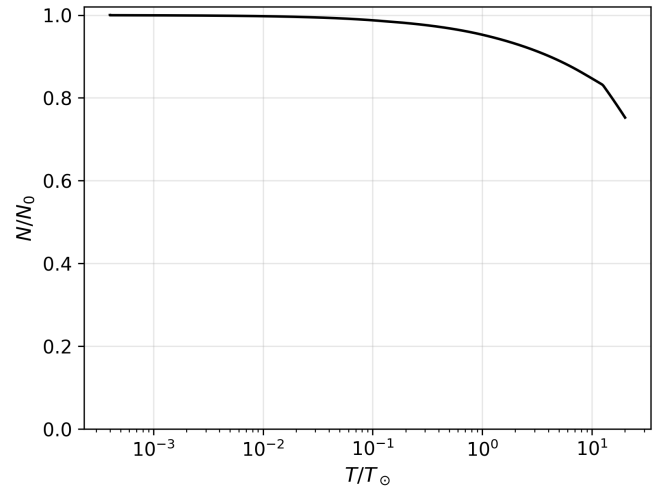
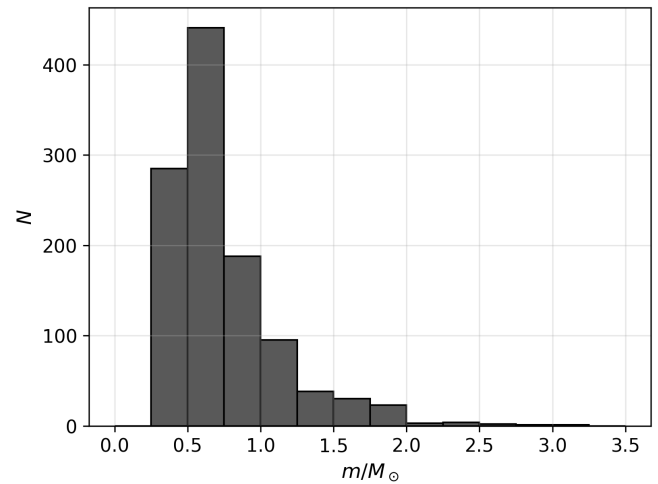
Рис. 2. Модельная зависимость N/N_0 от $T/T_{\odot}$ согласно IMF [7]

Рис. 3. Гистограмма распределения масс звёзд скопления King 13

7.1. Предельный блеск и массы звёзд скопления

В каталоге приведены данные о видимых звёздах. Если использовать принятую в работе оценку масса — светимость, то для всех скоплений, кроме NGC 136 (расстояние 5220 пк), звёзды в интервале масс от $\mathcal{M}_{\text{vis}} = 0.5\mathcal{M}_{\odot}$ до $1.0\mathcal{M}_{\odot}$ должны попадать в фотометрический предел каталога. В расчёте принят предельный блеск $m_{\text{lim}} = 21^{\text{m}}$ и абсолютная звёздная величина Солнца $M_{V,\odot} = 4.72^{\text{m}}$.

Найдём расстояние, на котором звезда массой $0.5\mathcal{M}_{\odot}$ становится слабее m_{lim} :

$$D = 10 \text{ пк} \cdot \sqrt{\frac{L(0.5\mathcal{M}_{\odot})}{L_{\odot}} \times 10^{-0.4(M_{V,\odot} - m_{\text{lim}})}} \approx 4510 \text{ пк}. \quad (8)$$

Для NGC 136 нижняя граница видимого интервала получается немного выше:

$$\frac{\mathcal{M}_{\text{vis}}}{\mathcal{M}_{\odot}} = \sqrt[4]{\left(\frac{5220}{10}\right)^2 \times 10^{0.4(M_{V,\odot} - m_{\text{lim}})}} \approx 0.538. \quad (9)$$

Дальнейший расчёт для этого скопления проводится по тому же алгоритму, но с этой изменённой нижней границей.

7.2. Оценка количества звёзд в скоплении в настоящий и начальный моменты времени

Из-за эффекта селекции мы не видим большую часть звёзд малой массы (рис. 3), которые, согласно модели, составляют большую долю от числа звёзд в скоплении. Опираясь на модельную начальную функцию масс и зная количество звёзд в калибровочном промежутке от $\mathcal{M}_{\text{vis}}$ до $1.0\mathcal{M}_{\odot}$, где $\mathcal{M}_{\text{vis}} = 0.5\mathcal{M}_{\odot}$ для всех скоплений, кроме NGC 136, мы можем оценить

$$\frac{N_{[0, 0.5]}^{\text{mod}}}{N_{[\mathcal{M}_{\text{vis}}, 1]}^{\text{obs}}} \approx \frac{\int_{0.01\mathcal{M}_{\odot}}^{0.5\mathcal{M}_{\odot}} \xi(\mathcal{M}) d\mathcal{M}}{\int_{\mathcal{M}_{\text{vis}}}^{1.0\mathcal{M}_{\odot}} \xi(\mathcal{M}) d\mathcal{M}}; \quad (10)$$

$$\frac{N_0^{\text{mod}}}{N_{[\mathcal{M}_{\text{vis}}, 1]}^{\text{obs}}} \approx \frac{\int_{0.01\mathcal{M}_{\odot}}^{100\mathcal{M}_{\odot}} \xi(\mathcal{M}) d\mathcal{M}}{\int_{\mathcal{M}_{\text{vis}}}^{1.0\mathcal{M}_{\odot}} \xi(\mathcal{M}) d\mathcal{M}}. \quad (11)$$

Здесь $N_{[\alpha, \beta]}$ — количество звёзд в промежутке масс $[\alpha\mathcal{M}_{\odot}, \beta\mathcal{M}_{\odot}]$ согласно модели. Обозначение mod соответствует модельным величинам, obs — наблюдаемым. Учтено, что звёзды малых масс не успевают проэволюционировать за время жизни скопления.

Тогда полное число звёзд

$$N = N_{\text{visual}} + N_{[0, 0.5]}^{\text{mod}} - N_{[0, 0.5]}^{\text{obs}}, \quad (12)$$

где N_{visual} — число звёзд, указанное в каталоге, $N_{[0, 0.5]}^{\text{obs}}$ — наблюдаемое количество звёзд с массой до $0.5\mathcal{M}_{\odot}$, а $N_{[0, 0.5]}^{\text{mod}}$ — число звёзд в этом диапазоне согласно модельной оценке. Отметим, что это приближение чувствительно к полноте каталога и звёздам поля, попавшим в область скопления.

Зная отношение N/N_0 , можно найти модельный возраст T_{model} скопления в рамках описанной выше простой эволюционной модели.

7.3. Испарение скопления

Дополнительно попытаемся учесть, что скопление теряет звёзды также вследствие *испарения*, то есть процесса, при котором в результате перераспределения энергий между звёздами скопления часть звёзд покидает скопление.

Под временем релаксации скопления T_{relax} в звёздной динамике принято понимать промежуток времени, в течение которого в системе под действием иррегулярных сил успевает восстановиться нарушенное максвеллово распределение скоростей [9–11]:

$$T_{\text{relax}} = 0.1357 \sqrt{\frac{NR^3}{G\bar{\mathcal{M}} \ln(\gamma N)}}, \quad \gamma \approx 0.4, \quad (13)$$

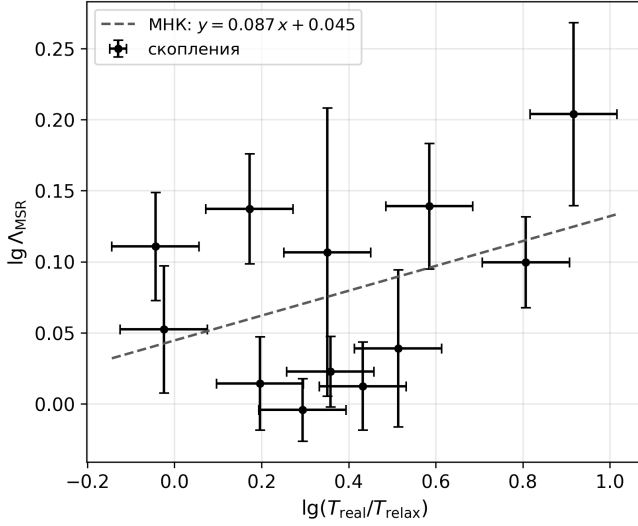
где N — число звёзд в скоплении, R — его средний эффективный радиус, $\bar{\mathcal{M}} \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{visual}}} \mathcal{M}_i / N_{\text{visual}}$ — средняя масса звезды скопления (по видимым звёздам), а радиус скопления $R = D\rho/2$, где ρ — каталожное значение видимого углового диаметра (в радианах).

В работе предполагается, что время релаксации каждого скопления постоянно. Более строгий подход требовал бы моделировать изменение радиуса, массы, числа звёзд и массовой функции со временем, что выходит за рамки данной учебно-исследовательской работы.

В моделях Spitzer — Hart скорость потери составляет величину порядка $0.5 \div 1\%$ звёзд за одно время релаксации [12]. В расчётах принято $k = 0.008$, что даёт поправку

$$(N/N_0)^* = (N/N_0) \cdot (1 + k)^{(T_{\text{real}}/T_{\text{relax}})}. \quad (14)$$

При учёте данной поправки получаем модельный возраст T_{model}^* .

Рис. 4. Зависимость $\lg \Delta_{\text{MSR}}$ от $\lg(T_{\text{real}}/T_{\text{relax}})$

Если поправка даёт значение больше единицы, оно ограничивается единицей, так как $N/N_0 > 1$ не имеет физического смысла; поэтому некоторые значения T_{model}^* в таблице 2 округляются до нуля. Даже с этой поправкой заметно, что согласно данной модели эволюция происходит значительно медленнее, чем в реальности.

Результаты вычислений модельных возрастов скоплений, а также заведомо более надёжная каталожная оценка возраста T_{real} приведены в таблице 2.

8. Результаты и обсуждение

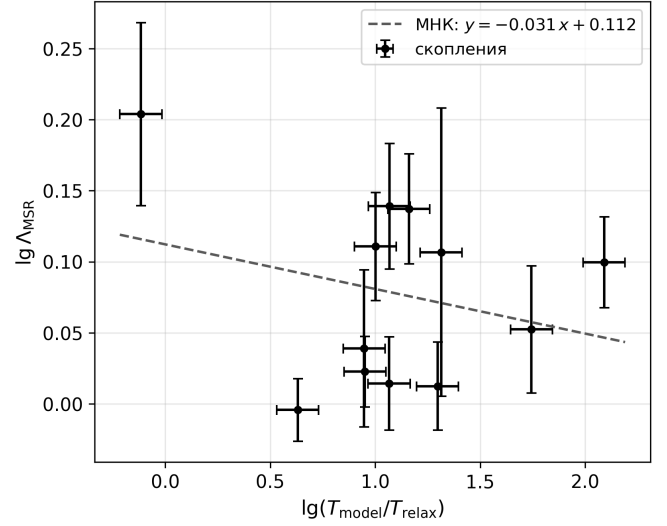
В нескольких скоплениях значение Δ_{MSR} отличается от единицы на уровне двух — трёх стандартных отклонений (например, Berkeley 97, King 12, King 18, King 19 и NGC 7788), но для остальных объектов отличие от $\Delta_{\text{MSR}} = 1$ невелико. Поэтому дальнейшие графики используются прежде всего для качественного анализа возможной тенденции.

Сначала рассмотрим зависимость Δ_{MSR} от динамического возраста $T_{\text{real}}/T_{\text{relax}}$, чтобы проверить, связана ли наблюдаемая степень сегрегации с числом прошедших времён релаксации (рис. 4). Для всей выборки прямая МНК имеет положительный наклон, но статистическая значимость этой тенденции невысока: для зависимости

$$\lg \Delta_{\text{MSR}} = a \lg(T_{\text{real}}/T_{\text{relax}}) + b$$

$$a = 0.087 \pm 0.063,$$

$$r \approx 0.40, \quad p \approx 0.20.$$

Рис. 5. Зависимость $\lg \Delta_{\text{MSR}}$ от $\lg(T_{\text{model}}/T_{\text{relax}})$

Скопления с $\Delta_{\text{MSR}} \approx 1$ (NGC 7245, NGC 7261, NGC 7296, NGC 136) практически не показывают массовой сегрегации в рамках нашей оценки. При исключении этих скоплений из рассмотрения положительная тенденция визуально заметнее, но и здесь она остаётся весьма условной:

$$a = 0.066 \pm 0.052,$$

$$r \approx 0.46, \quad p \approx 0.26.$$

В целом такой результат согласуется с представлением, что в процессе парной релаксации массивные звёзды могут постепенно концентрироваться к центральным областям скопления [13], но выборка слишком мала, чтобы говорить о наличии статистически значимой зависимости.

Далее рассмотрим зависимость Δ_{MSR} от отношения $T_{\text{model}}/T_{\text{relax}}$ (рис. 5). В данном случае коэффициент сегрегации практически не зависит от времени:

$$a = -0.031 \pm 0.036,$$

$$p \approx 0.41,$$

что ожидаемо: в принятой простой модели распределение звёзд одной массы однородно, и в течение эволюции одновременно исчезают все звёзды данной массы, т.е. сама модель не создаёт пространственную сегрегацию.

Можно сделать вывод, что полученные оценки возраста скоплений за счёт накопления множества косвенных модельных ошибок весьма посредственно отражают реальное положение дел.

Таблица 2. Результаты расчётов модельных возрастов скоплений

Скопление	Berkeley 96	Berkeley 97	King 12	King 13	King 18	King 19
N_{visual}	1235	888	706	1114	806	413
$\lg T_{\text{real}}$	7.60	8.40	7.85	8.85	8.10	8.75
N_0	8081	5072	4322	6935	5347	2403
N	7913	4913	4280	6806	5264	2399
N/N_0	0.979	0.969	0.990	0.981	0.984	0.998
$\lg T_{\text{relax}}$	7.62	7.59	7.68	8.34	8.14	7.83
$(N/N_0)^*$	0.987	1.000	1.000	1.000	0.992	1.000
T_{model} , Gyr	2.34	4.82	0.69	1.92	1.40	0.05
T_{model}^* , Gyr	1.10	0.00	0.00	0.00	0.56	0.00
$T_{\text{real}}/T_{\text{relax}}$	0.95	6.41	1.49	3.26	0.90	8.25
Скопление	King 20	NGC 136	NGC 7245	NGC 7261	NGC 7296	NGC 7788
N_{visual}	518	874	1304	782	808	777
$\lg T_{\text{real}}$	8.20	8.40	8.50	8.20	8.45	8.20
N_0	1951	6939	9482	4509	5524	5391
N	1920	6853	9390	4446	5417	5350
N/N_0	0.984	0.988	0.990	0.986	0.981	0.992
$\lg T_{\text{relax}}$	7.85	8.04	8.21	8.00	8.02	7.61
$(N/N_0)^*$	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000
T_{model} , Gyr	1.45	0.98	0.69	1.17	2.06	0.48
T_{model}^* , Gyr	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
$T_{\text{real}}/T_{\text{relax}}$	2.24	2.28	1.97	1.57	2.71	3.85

9. Ограничения используемых методов

Главное ограничение в настоящем исследовании связано с тем, что массы звёзд получены из одной фотометрической величины и расстояния до скопления. При более строгом подходе необходимо учитывать покраснение, болометрические поправки, вероятность членства по собственным движениям и параллаксам, а также использовать изохроны, соответствующие возрасту и металличности каждого скопления.

Кроме того, радиус в оценке времени релаксации принят равным половине видимого диаметра, хотя в формуле (13) должен использоваться радиус для половины массы. Используемые приближения не обесмысливают результаты, но ограничивают силу выводов.

10. Заключение

Метод MST был применён к реальным каталожным данным, и для 12 рассеянных скоплений получены значения показателя массовой сегрегации Λ_{MSR} . Наиболее заметные признаки массовой сегрегации в рамках этой методики получены для Berkeley 97, King 12, King 18, King 19 и NGC 7788.

Наблюдаемая зависимость $\Lambda_{\text{MSR}}(T_{\text{real}}/T_{\text{relax}})$ служит качественным аргументом в пользу того, что массовая сегрегация может усиливаться на временах порядка

времени релаксации. Однако статистическая значимость этой тенденции невысока, поэтому результат следует рассматривать лишь как указание на возможную связь. В то же время зависимость $\Lambda_{\text{MSR}}(T_{\text{model}}/T_{\text{relax}})$ показывает, что простая модель эволюции числа звёзд не даёт удовлетворительных результатов.

Основной результат работы — построение самосогласованной оценки, показывающей возможную связь между динамическим возрастом скопления и выраженностью массовой сегрегации. Для строгой проверки этой связи необходимо в первую очередь расширить выборку скоплений и уточнить оценки масс звёзд скоплений.

Список литературы

- [1] Automated search for star clusters in large multiband surveys. II. Discovery and investigation of open clusters in the Galactic plane / E. V. Glushkova [и др.] // Astronomy Letters. 2010. Т. 36, № 2. С. 75–85. DOI: 10.1134/S1063773710020015. arXiv: 0910.1330 [astro-ph.GA].
- [2] Sternberg Astronomical Institute Open Clusters Catalog (SAI OCL) / E. V. Glushkova [и др.]. 2009. URL: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/V/132>; SAI OCL website: <http://ocl.sai.msu.ru/catalog/>. VizieR Online Data Catalog, V/132.
- [3] Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters / N. V. Kharchenko [и др.] // Astronomy & Astrophysics. 2013. Т. 558. A53. DOI: 10.1051/0004-6361/201322302. arXiv: 1308.5822 [astro-ph.GA].

- [4] Using the minimum spanning tree to trace mass segregation / R. J. Allison [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2009. Т. 395, № 3. С. 1449–1454. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.14508.x. arXiv: 0901.2047 [astro-ph.GA].
- [5] *Introduction to Algorithms* / T. H. Cormen [и др.]. 3-е изд. Cambridge, MA : MIT Press, 2009.
- [6] *Duric N. Advanced Astrophysics*. Cambridge University Press, 2004.
- [7] *Kroupa P. On the variation of the initial mass function* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2001. Т. 322, № 2. С. 231–246. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x.
- [8] *Kroupa P., Jerabkova T. The Salpeter IMF and its descendants* // *Nature Astronomy*. 2019. Т. 3. С. 482–484. DOI: 10.1038/s41550-019-0793-0. arXiv: 1910.01126 [astro-ph.SR].
- [9] *Chandrasekhar S. Principles of Stellar Dynamics*. University of Chicago Press, 1942.
- [10] *Spitzer Jr. L., Hart M. H. Random Gravitational Encounters and the Evolution of Spherical Systems. I. Method* // *The Astrophysical Journal*. 1971. Т. 164. С. 399–409. DOI: 10.1086/150855.
- [11] *Binney J., Tremaine S. Galactic Dynamics*. 2-е изд. Princeton University Press, 2008.
- [12] *Spitzer Jr. L., Hart M. H. Random Gravitational Encounters and the Evolution of Spherical Systems. II. Models* // *The Astrophysical Journal*. 1971. Т. 166. С. 483–511. DOI: 10.1086/150977.
- [13] *Spitzer Jr. L. Equipartition and the Formation of Compact Nuclei in Spherical Stellar Systems* // *The Astrophysical Journal Letters*. 1969. Т. 158. С. L139. DOI: 10.1086/180451.

Астрономическое образование, 2026. Материал предоставлен на условиях лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 (С указанием авторства – С сохранением условий). Разрешено свободно делиться (обмениваться) – копировать и распространять материал на любом носителе и в любом формате в любых целях, включая коммерческие; адаптировать (создавать производные материалы) – делать ремиксы, видоизменять и создавать новое, опираясь на этот материал в любых целях, включая коммерческие; при условии обеспечения соответствующего указания авторства, предоставления ссылки на лицензию и обозначения изменений, если таковые были сделаны. Производные материалы должны распространяться на таких же условиях.