

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Селезнева Антона Федоровича

«Исследования населения, структуры и динамики звездных скоплений»,  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических  
наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Диссертационная работа «Исследования населения, структуры и динамики звездных скоплений» посвящена всестороннему изучению звёздных скоплений: рассеянных (РЗС) и шаровых (ШЗС) скоплений нашей Галактики, а также очень молодого скопления NGC 2070 в Большом Магеллановом облаке. Звёздные скопления представляют собой «кирпичики», из которых сложены Млечный Путь и другие галактики. Все физические характеристики для скоплений определяются намного точнее, чем для отдельных звёзд, поэтому с их помощью можно исследовать структуру, кинематику, динамику и эволюцию нашей Галактики. Изучение функции светимости и функции масс рассеянных скоплений даёт понимание процессов звёздообразования. Поэтому интерес к звёздным скоплениям не ослабевает в течении столетий, но особенно он усилился в последние десятилетия после появления больших обзоров неба, в первую очередь инфракрасных, которые позволили исследовать молодые «погружённые» скопления, и, конечно, каталогов космической миссии GAIA (DR1, DR2, eDR3), которые заметно расширили диапазон расстояний и точность получаемых физических характеристик рассеянных и шаровых скоплений. Этими факторами объясняется очевидная **актуальность** выполненной диссертационной работы.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы. Довольно объёмное **Введение** представляет хороший обзор современного состояния в области исследования звёздных скоплений Млечного Пути, демонстрируя широкий кругозор автора диссертационной работы. Во Введении описаны цели и задачи работы, методология и методы проведённых исследований, доказана актуальность работы, новизна и достоверность полученных результатов, их научная и практическая значимость. Указаны положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора в совместные работы. Приведён список публикаций по теме диссертации, перечислены конференции, на которых прошла апробация работы.

Несмотря на то, что публикации по теме диссертации охватывают 28-летний период, работа представлена в виде цельного труда. **В первой главе** автор описывает разработанный им **новый** эффективный метод исследования функций распределения поверхностной плотности скоплений (в виде распределения поверхностной и пространственной плотности числа звёзд вдоль радиуса скопления и карт распределения поверхностной плотности), а именно метод KDE (Kernel Density Estimator), потом последовательно применяет этот метод к различным объектам: бедным маломассивным РЗС, богатым РЗС (во второй главе), ШЗС (в третьей главе), очень молодым «погружённым» скоплениям, скоплениям БМО (в четвёртой главе), скоплениям, находящимся на разных гелиоцентрических расстояниях. В последней пятой главе метод KDE применяется для изучения функции масс и функции светимости скоплений. И

езде этот метод успешно работает. В первой главе с его помощью не только определены структурные, а на их основе и физические параметры 25 рассеянных скоплений (причём 20 РЗС исследованы впервые), но и изучено искривление и уширение диска Галактики в третьем квадранте. Хочется отметить, что А.Ф. Селезнев совместно с соавторами получил оригинальные наблюдательные данные многоцветной фотометрии в полях 29 рассеянных скоплений южного неба, которые представляют ценность сами по себе, а также демонстрируют комплексный подход автора к проблеме и его высокую квалификацию.

**Во второй главе** описаны результаты применения метода KDE при исследовании десяти хорошо изученных богатых РЗС, причем три скопления расположены на расстояниях менее 200 пк от Солнца, что позволяет включить в работу их самые маломассивные члены. По данным каталога 2MASS PSC и Gaia DR2 обнаружены протяжённые короны скоплений, раскрыта природа их формирования и причины динамической устойчивости в гравитационном поле Галактики. Предложена **новая** модель для аппроксимации радиального распределения поверхностной плотности скоплений, которая состоит из комбинации функции Кинга и функции плотности для однородной и протяжённой короны. Предложен **новый** статистический метод выделения звёзд, принадлежащих скоплению, который лучше подходит при изучении функций распределения различных величин, характеризующих скопления. Получены **новые** крайне интересные результаты: обнаружены приливные хвосты скоплений Ruprecht 147 и  $\alpha$  Per; выделен поток, на который проецируется скопление  $\alpha$  Per, исследован звёздный состав, структура и кинематические особенности потока; доказано вращение ядра скопления Плеяды в прямом (совпадающим с направлением вращения Галактики), а его внешних частей – в обратном направлении. Отдельно надо отметить создание интерактивного атласа рассеянных скоплений Галактики, включающий в настоящее время информацию о 3291 РЗС, который можно смело считать частью Всемирной Виртуальной Обсерватории. Он прост и удобен в использовании, хотя не так прост в реализации.

**Третья глава** посвящена исследованию двух шаровых звёздных скоплений:  $\omega$  Cen - самому массивному в Млечном Пути и Agr 2 – одному из самых бедных ШЗС Галактики (их массы отличаются в 100 раз). Применяя уже хорошо зарекомендовавший себя метод KDE и разработанный соискателем **новый** метод аппроксимации изолиний поверхностной плотности эллипсами автору диссертации удалось изучить особенности распределения поверхностной плотности звёзд разных поколений в  $\omega$  Cen и структуру пространственного распределения звёзд, населяющих разные последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рассела в скоплении Agr 2. Получены **новые** значимые результаты. Обнаружено, что звёзды разных поколений в  $\omega$  Cen показывают разную концентрацию к центру скопления, их центры распределения не совпадают, а аппроксимирующие плотность эллипсы по-разному ориентированы. Найдено также, что «голубые бродяги» в Agr 2, с одной стороны, сильнее концентрируются к центру, чем звёзды главной последовательности, а с другой стороны, показывают схожее пространственное распределение с красными гигантами и звёздами горизонтальной ветви. Эти результаты позволили сделать предположения об ответе на загадочный в течении последних 20 лет вопрос о

происхождении звёзд разных поколений в шаровых скоплениях и о природе «голубых бродяг».

**В четвёртой главе** диссертации автор обращается к изучению экстремально молодых скоплений: NGC 2070 в Большом Магеллановом Облаке и группы скоплений в области звездообразования G174+2.5 нашей Галактики. С помощью диаграмм «цвет-величина», построенным по данным из литературы, найдено различие в возрасте для отдельных групп звёзд, выделенных в области NGC 2070, а также исследованы радиальные профили плотности для всех этих групп, сделан вывод о продолжающемся индуцированном звездообразовании в этой области. Получена нижняя оценка массы скопления NGC 2070. Методом KDE по данным из каталога 2MASS изучено распределение поверхностной плотности в области G174+2.5 и найдено одно **новое** молодое скопление. Доказана эффективность работы метода KDE в областях звездообразования, где помимо скоплений звёзд находятся плотные сгустки вещества родительского облака.

**В главе пять** метод KDE применяется для исследования функций светимости и функций масс звёздных скоплений, что является **новым** использованием алгоритма KDE по сравнению с исследованиями, изложенными в предыдущих главах, и, в частности, предложена версия алгоритма, строящая функцию светимости скопления в присутствии звёзд поля. Получена функция блеска и функция светимости шарового скопления Palomar 1. Для P3C NGC 4815 построена функция блеска и функция масс, а также её аппроксимация двумя степенными законами, и найден значимый минимум для этих функций в области 0.9 солнечных масс, что прекрасно согласуется с результатами других исследований для рассеянных скоплений. Использование метода KDE позволило обнаружить сегрегацию звёзд по массе, например, при исследовании функции масс отдельно для ядра и отдельно для короны скопления Ruprecht 147, а также слабую сегрегацию масс в Плеядах. Сделана оценка масс Ruprecht 147 и Плеяд. Очень интересен результат сравнения динамической и фотометрической оценок массы скопления NGC 4337, основанный, в частности, на данных оригинальных фотометрических наблюдений, выполненных автором. В этой же главе исследовано влияние неразрешённых двойных и кратных систем на фотометрическую оценку массы, а также предложен **новый** метод учёта таких систем при определении массы скопления. Получена таблица поправочных множителей к оценке массы скопления, учитывающая различные сценарии кратности.

**В Заключение** дается краткая сводка полученных в работе результатов и описываются планы будущих исследований. Список литературы содержит 299 ссылок.

Если говорить о работе в целом, то она представляет собой превосходный пример комплексного подхода к исследованию самых интересных объектов с точки зрения галактической астрономии, а именно звёздных скоплений. Не вызывает сомнения **новизна и оригинальность** диссертации – в работе представлены как новые методы исследования, разработанные автором, так и большое количество оригинальных результатов, что подтверждается публикациями в ведущих мировых журналах и большим количеством цитирований этих работ. Все положения, выносимые на защиту, грамотно обоснованы и

верифицированы проведёнными наблюдениями, расчётами, теоретическими выкладками, модельными построениями.

**Достоверность результатов** обеспечивается грамотным подходом к обработке и интерпретации данных - всегда приводятся оценки статистической значимости, учитывается неполнота данных, оценки параметров проводятся несколькими способами, даётся сравнение с результатами, полученными другими авторами. Все выводы проиллюстрированы большим количеством прекрасного качества рисунков, графиков и таблиц. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне, демонстрируя высочайшую квалификацию автора как астронома-наблюдателя, астрофизика и программиста. Диссертация написана грамотным и понятным языком, легко читается.

Перечислю ряд недостатков и замечаний, которые никак не умаляют значимость работы, а направлены на улучшение её качества, особенно в свете того, что автор планирует написать монографию по звёздным скоплениям, которая, в первую очередь, будет востребована студентами и аспирантами, обучающимися по астрономическим специальностям.

- Имеется путаница в терминологии. Так, на стр.10 Введения указано, что в шаровых скоплениях обнаружены «разные населения звёзд», имея в виду разделение основных последовательностей на диаграммах Герцшпрунга-Рассела (Г-Р) ШЗС на две и более параллельных. Но на стр. 18 «разными населениями звёзд» названы звёзды, расположенные на различных последовательностях Г-Р диаграммы: на главной последовательности, на ветви красных гигантов, в области голубых бродяг.
- В первой главе строится распределение по радиусу поверхностной плотности для малонаселённых и довольно молодых РЗС, клочковатая структура которых далека от правильной формы. В ряде скоплений наблюдается несколько центров концентрации плотности. Тем не менее автор усредняет поверхностную плотность по азимуту и находит радиус скопления, хотя вернее было бы говорить о характерном размере. Тем более, что и положение центра, и радиус зависят от предельной звёздной величины звёздных подсчетов.
- Неясно, что автор подразумевает под термином «ядро скопления», который впервые появляется на стр. 55 первой главы, где исследованы РЗС неправильной формы и клочковатой структуры, и далее многократно используется. Только во второй главе на стр. 86 дается пояснение этого термина в рамках комбинированной модели Кинга.
- В Таблице 1.1 координаты центров взяты из литературы. Непонятно, почему они не определены автором. Неясно также, как выбиралась предельная величина звёздных подсчетов, указанная в столбце 6 этой таблицы. Не указано, каким способом были определены фундаментальные параметры скоплений из Таблицы 1.2. Неясно, почему в столбце 5 этой таблицы показатели цвета  $E(V-I)$  указаны не для всех скоплений, для которых имеются  $UBVI$  величины, а в столбце 6 модули расстояний даны не для всех скоплений, у которых определены расстояния. Подобные пробелы

в значениях встречаются в других таблицах без объяснения в тексте причин этих пробелов. Необходимо пояснить, почему для скопления Hogg 19 получились равные избытки цвета  $E(B-V)$  и  $E(V-I)$ .

- При описании результатов, полученных по индивидуальным скоплениям в главе 1, несколько раз отмечается (например, на стр. 57), что «фотометрические диаграммы не показывают наличие скопления». Что подразумевается под фотометрическими диаграммами? Если это просто диаграммы «цвет-величина», а не диаграммы Хесса, то бедное скопление может быть незаметно на плотном фоне галактического диска.
- Атлас рассеянных скоплений хорошо бы дополнить картами распределения поверхностной плотности и расстояниями до скоплений для более эффективного использования. Было бы неплохо иметь возможность задавать не только координаты, но и размер области, а также задавать списком все объекты.
- Неясно, учитывался ли в главе 2 при отборе членов скоплений эффект проекции, который существенен для всех трёх близких P3C - Ruprecht 147, Плеяд,  $\alpha$  Per (см., например, работу Gaia Collaboration et al., 2018, A&Ap, arXiv 1804.09378). Неучёт этого эффекта может дать ошибочное разбиение на кластеры выборки C3 при исследовании потока в области  $\alpha$  Per (стр. 120 и рис.2.19).
- Из описания наблюдательных данных для скопления Palomar 1 на стр. 224 неясно, как именно получены эти данные – автором диссертации или взяты из литературных источников.
- Неудобны ссылки без указания фамилий первых авторов, особенно когда надо понимать, идет ли речь о публикации, в которой изложены результаты диссертации, или о другой работе. Например, во Введении только в ссылке под порядковым номером 86 первый раз появляется фамилия автора статьи.

Хочется отметить, что перечисленные выше замечания только повышают ценность и подчёркивают актуальность работы, поскольку свидетельствуют о высоком интересе читателя к представленному фундаментальному труду.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Результаты, выносимые на защиту, опубликованы в двадцати четырёх статьях в рецензируемых изданиях, причём половина – в журналах из квартиля Q1. Кроме того результаты диссертации были представлены на многочисленных российских и международных конференциях и отражены в 27 публикациях в трудах этих конференций. Полученные А.Ф. Селезневим результаты будут востребованы в различных астрономических учреждениях России, таких как МГУ, ИНАСАН, САО РАН, СПбГУ, ЮФУ, КрАО РАН, а также за рубежом.

Диссертация «Исследования населения, структуры и динамики звездных скоплений» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Антон Федорович Селезнев, вне всяких сомнений, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Доктор физико-математических наук,  
доцент кафедры астрофизики и звёздной астрономии  
физического факультета Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)

доцент

Глушкова Елена Вячеславовна

24 января 2022 г.

Почтовый адрес:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2,

МГУ имени М.В. Ломоносова,

физический факультет

Телефон: +79037220899

Эл. адрес: [elena@sai.msu.ru](mailto:elena@sai.msu.ru)

Подпись Е.В. Глушковой заверяю.

декан физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

профессор



Сысоев Николай Николаевич