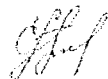


На правах рукописи



Путков Станислав Игоревич

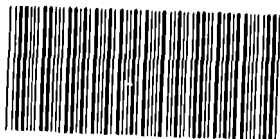
**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАСSEЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

25 СЕН 2014



005552746

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,
ДАНИЛОВ Владимир Михайлович

Официальные оппоненты:

ПОЛЯЧЕНКО Евгений Валерьевич,
доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник отдела физики звездных систем, руководитель группы физики звездных и планетных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт астрономии Российской академии наук».

ОСИПКОВ Леонид Петрович,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры космических технологий и прикладной астродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва (ГАИШ МГУ).

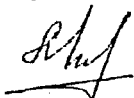
Защита диссертации состоится 17 октября 2014 г. в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН) по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН

Автореферат разослан «16» 09 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Милецкий Евгений Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Результаты работ по изучению динамической эволюции моделей рассеянных звездных скоплений (РЗС) приводят к выводу о возникновении в моделях РЗС колебаний радиуса, плотности, регулярного поля и других характеристик, не прекращающихся на протяжении нескольких времен релаксации (например, [1–3]). В отмеченных работах были получены решения gross-динамических уравнений при различных упрощающих предположениях. Однако до сих пор аналитические решения gross-динамических уравнений не использовались для массовых оценок параметров нестационарности реальных РЗС (амплитуд колебаний величин радиуса, вириального коэффициента и др.) на основе данных о структурных параметрах этих скоплений. В настоящей работе рассмотрены четыре модели РЗС, найдены аналитические решения gross-динамических уравнений, показано, что решения для сферической модели со структурой ядро-гало позволяют получить значения параметров нестационарности, согласующиеся с численными оценками соответствующих параметров. Аналитические решения gross-динамических уравнений для этой модели использованы для вычисления значений параметров нестационарности и их погрешностей для 87 РЗС. Поскольку при gross-динамическом подходе к исследованию РЗС вводятся некоторые ограничения на форму моделей РЗС или распределение звезд, то представляет интерес рассмотрение динамики РЗС в более общем случае произвольного распределения звезд в скоплениях, которое может возникать в ходе эволюции. Также неизвестен полный спектр частот колебаний РЗС, их устойчивость.

Важным методом исследования динамики РЗС являются численные расчеты N -body моделей. В большинстве существующих численных работ по динамике звездных систем используются разностные схемы 4-го порядка точности (например, [4–6]). В данной работе используются результаты численных расчетов значений фазовых координат звезд методами 10-го и 11-го порядков точности для нескольких моделей РЗС, полученные в [7]. Показано, что полученные в двух указанных порядках точности статистические распределения корреляционных функций для рассмотренных моделей одинаковы при $t \leq (3-5)\tau_{vr}$, где τ_{vr} – начальное время бурной релаксации модели скопления. Это время сравнимо со средним временем жизни РЗС. Достигнутая в [7] точность вычисления фазовых координат звезд позволяет проводить прямые вычисления корреляционных функций для параметров движения звезд.

В работе впервые исследованы корреляции между модулями радиус-векторов звезд, модулями скоростей звезд, удельными энергиями, плотностями распределения звезд и фазовыми плотностями, а также вычислены взаимные корреляционные функции между колебаниями фазовой плотности и потенциала в центре модели скопления и в точках на окружающих его сферических поверхностях различных радиусов. Анализ распределений корреляций, динамики корреляций и спектральный анализ взаимных корреляционных функций позволяет рассмотреть коллективное поведение звезд и колебания моделей без ограничений на распределение звезд, найти полный спектр колебаний фазовой плотности, исследовать вопрос устойчивости этих колебаний.

Из наблюдений обнаружен ряд структурных и динамических особенностей РЗС: иррегулярная форма ядер, наличие ступенчатых структур на радиальных профилях плотности, низкая дисперсия скоростей звезд в ядрах РЗС, рост дисперсии скоростей звезд с удалением от центра скопления и другие, указывающие на неравновесность РЗС ([8] и другие). Дальнействующая природа гравитационных сил, в том числе влияние внешнего поля, является причиной немарковского характера взаимодействия звезд, возникновения корреляций в движениях звезд [9]. Колебания скоплений, иррегулярность в распределении звезд, эффекты поляризации и другие проявления нестационарности связаны с коллективными движениями звезд в РЗС. Кандруп в работе [10] предложил гипотезу об увеличении общей когерентности движений звезд (т.е. о нарастании корреляций) в далеких от равновесия звездных системах в сравнении с бесстолкновительными системами при обычной бурной релаксации. В настоящее время коллективные движения звезд, механизмы неустойчивости коллективных движений звезд и характерные величины параметров колебаний в моделях и реальных РЗС остаются малоизученными. Имеются работы (Чаванис [11] и др.), посвященные исследованию динамики систем многих частиц (в том числе гравитирующих), на основе кинетических уравнений для одночастичных функций распределения и двухчастичных корреляционных функций. Однако в этой и других аналогичных работах в конечных уравнениях, применимых к неоднородным гравитирующим системам с немарковским характером взаимодействия, пренебрегается некоторыми коллективными эффектами. На данный момент наиболее целесообразным для изучения коллективного поведения звезд в скоплениях представляется использование прямого метода вычисления корреляционных функций по данным о фазовых координатах звезд,

полученных в ходе численного решения задачи N тел методами достаточно высокого порядка точности, чтобы на рассматриваемом промежутке времени получаемые статистические характеристики сохраняли устойчивость.

Исследование корреляций для ряда параметров движения звезд в скоплениях и спектра колебаний фазовой плотности позволяет выявить и изучить коллективные движения звезд в РЗС, обусловленные действием различных механизмов. Эти коллективные движения и их неустойчивости определяют нерегулярность строения таких скоплений: нерегулярную форму ядер, не соответствующую равновесному состоянию, ступенчатые структуры на радиальных профилях плотности. Понимание природы неустойчивостей коллективных движений позволит объяснить причины формирования подобных структур в РЗС. Теоретическому изучению механизмов неустойчивости в РЗС и их моделях должно предшествовать изучение полного спектра устойчивых и неустойчивых колебаний таких систем.

Цели и задачи

1. Получение для простых моделей скоплений аналитических решений уравнений гросс-динамики и использование этих решений для оценок ряда величин, характеризующих степень нестационарности скопления (равновесного значения вириального коэффициента, абсолютной и относительной амплитуд колебаний вириального коэффициента скопления, абсолютной и относительной амплитуд колебаний радиусов ядра и гало скопления и других параметров) для 87 РЗС.

2. Вычисление двухвременных и двухчастичных корреляционных функций для ряда параметров движения звезд в РЗС: модулей радиус-векторов звезд относительно центра масс скопления, модулей скоростей звезд относительно центра масс скопления, плотностей распределения звезд, удельных энергий и фазовых плотностей звезд по численным данным о фазовых координатах звезд для моделей РЗС. Анализ результатов расчета двухвременных и двухчастичных корреляционных функций.

3. Вычисление взаимных корреляционных функций для флуктуаций фазовой плотности, Фурье-преобразование этих функций и получение спектров частот и дисперсионных кривых для колебаний фазовой плотности. Анализ спектров частот и дисперсионных кривых.

4. Исследование влияния сглаживания потенциала на спектры частот, дисперсионные кривые и характеристики РЗС, получаемые по численным данным о фазовых координатах звезд.

Научная новизна

Впервые определены параметры нестационарности для выборки из 87 РЗС: контраст плотностей ν , амплитуда колебаний вириального коэффициента $\delta\alpha$, периоды колебаний ядра и гало P_1 и P_2 соответственно, относительная амплитуда колебаний радиуса ядра $\delta R_1/R_{1,0}$, среднее по периоду колебаний значение вириального коэффициента α_0 , относительная амплитуда колебаний вириального коэффициента $\delta\alpha/\alpha_0$, дисперсия скоростей звезд σ_v^2 .

Точность численных данных, полученных с помощью разностных схем 10-го и 11-го порядков точности, позволила применить прямой метод вычисления корреляционных функций для динамических моделей РЗС. Впервые исследованы распределения корреляций между величинами модулей радиус-векторов r звезд, модулями скоростей v звезд, удельными энергиями ε звезд, плотностями n распределения звезд и фазовыми плотностями f и динамика корреляций величин n и f .

Адаптирован метод спектрального анализа флуктуаций, разработанный в физике плазмы для исследования неустойчивых колебаний плазмы, для анализа флуктуаций фазовой плотности. С помощью этого метода удалось определить большое число частот устойчивых и неустойчивых колебаний фазовой плотности в моделях РЗС.

Получены параметры корреляций для величин r, v, ε, n, f . Исследованы потоки корреляций указанных величин. Построены спектры частот и дисперсионные кривые для колебаний фазовой плотности и потенциала. Найдены большое число новых частот колебаний фазовой плотности (несколько десятков в каждой модели) и времена развития неустойчивости этих колебаний. В моделях РЗС обнаружены волны фазовой плотности и потенциала U , сложное поведение этих волн (отражение, распад на составляющие с соизмеримыми частотами в центральных областях или на границе ядра скопления). Обнаружены признаки слабой турбулентности в движениях звезд ядра в модели 1 с наибольшей степенью нестационарности.

Показано, что увеличение параметра сглаживания потенциала в численных моделях РЗС (приблизительно в два раза) уже может существенно влиять на спектры частот и дисперсионные кривые, а также на многие характеристики РЗС: плотность распределения звезд, среднеквадратичную скорость звезд, суммарную кинетическую энергию звезд, число звезд в ядре модели РЗС. При указанном увеличении параметра сглаживания

перечисленные характеристики уменьшаются, при этом степень нестационарности почти не меняется.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные значения динамических параметров РЗС можно использовать в теоретических и численных исследованиях динамики РЗС, построении моделей РЗС.

Информация о корреляциях для ряда параметров движения звезд в скоплениях и полном спектре устойчивых и неустойчивых колебаний фазовой плотности позволит выявить и изучить коллективные движения звезд в РЗС, обусловленные действием различных механизмов, и понять природу неустойчивостей коллективных движений. Эти коллективные движения и их неустойчивости определяют наблюдаемую нерегулярность строения таких скоплений: нерегулярную форму ядер, не соответствующую равновесному состоянию, ступенчатые структуры на радиальных профилях плотности.

Личный вклад автора

В совместных работах автор принимал участие в постановке задачи, выводе аналитических результатов, выполнении вычислений, обработке, анализе и обсуждении результатов.

Автором выполнены:

- основная часть расчетов параметров нестационарности и их погрешностей для 87 РЗС и подготовлена публикация электронного каталога: "Dynamical parameters of open clusters" в Центре астрономических данных в Страсбурге (CDS), доступном на <http://cdsarc.u-strasbg.fr/cgi-bin/Vizier?source=J/AZh/89/674>;

- основная часть расчетов двухвременных и двухчастичных корреляционных функций для величин $v=|\vec{v}|$, $r=|\vec{r}|$, энергии ε движения звезды, приходящейся на единицу массы звезды, фазовой плотности $f=f(\vec{r},\vec{v},t)$ и плотности числа звезд $n=n(\vec{r},t)$ для нескольких моделей РЗС, построены распределения этих функций;

- основная часть расчетов взаимных корреляционных функций между радиальными колебаниями фазовой плотности в центре скопления и в точках на сферических поверхностях различного радиуса, спектров частот и дисперсионных кривых колебаний ФП в моделях РЗС;

- расчеты и анализ взаимных корреляционных функций между радиальными колебаниями фазовой плотности в точках на оси скопления и в

точках на цилиндрических поверхностях различного радиуса, спектров частот и дисперсионных кривых колебаний ФП в моделях РЗС;

- результаты работы доложены на 7-ми научных конференциях.

Методология и методы исследования

Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых в области исследования динамики систем многих частиц методами гросс-динамики, применения кинетических уравнений, численных методов, а также корреляционных и спектральных методов, разработанных и применявшихся ранее для исследования неустойчивых колебаний плазмы.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитические выражения для периодов колебаний скоплений и ядер скоплений, равновесного значения вириального коэффициента, абсолютных и относительных амплитуд колебаний вириального коэффициента, амплитуд колебаний радиусов ядра и гало для гомологичных и негомологичных колебаний сферических моделей РЗС с радиально-симметричным распределением массы. Числовые оценки параметров нестационарности для 87 РЗС. Неточность (занижение) оценки числа звезд в гало РЗС при использовании распределения Кинга. Систематическое завышение вириальных масс РЗС при неучете неизолированности и нестационарности РЗС.

2. Корреляции между характеристиками движения звезд в моделях РЗС: модулями радиус-векторов звезд относительно центра масс, модулями скоростей звезд относительно центра масс, удельных энергий, пространственных плотностей и фазовых плотностей распределения звезд. Оценки параметров корреляций: времен корреляции и радиусов корреляции для динамических характеристик звезд, распределения корреляций, анализ потоков корреляций. Оценка темпа нагрева ядер моделей РЗС в результате разрушения корреляций между параметрами движения звезд. Слабая турбулентность в движениях звезд ядра модели скопления с наибольшей степенью нестационарности.

3. Взаимные корреляционные функции, спектры частот и дисперсионные кривые для колебаний фазовой плотности и потенциала. Большое число неизвестных ранее устойчивых и неустойчивых колебаний фазовой плотности и потенциала в моделях РЗС, времена развития неустойчивости колебаний. Независимость частот колебаний фазовой плотности от способа выбора точек

для расчета взаимных корреляционных функций. Радиальные волны фазовой плотности и потенциала в моделях РЗС. Сложное поведение волн фазовой плотности (распад, отражение) внутри ядер и на границе ядер моделей РЗС.

4. Закономерности изменения спектров частот и дисперсионных кривых, характеристик РЗС при увеличении параметра сглаживания потенциала. Согласованность спектров частот колебаний фазовой плотности и потенциала при $\nu < 2.5\tau_{\nu,\nu}^{-1}$.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты, полученные в работе, представлены в реферируемых статьях и выступлениях на международных и российских конференциях. Достоверность полученных физических результатов подтверждается их согласованностью с общепризнанными представлениями о возможности колебаний моделей РЗС, существующими оценками известных частот колебаний, возможности роста когерентности в движениях звезд в РЗС.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 40-я международная студенческая конференция: "Физика космоса" 31 янв — 04 февр. Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 2011 г.
- Всероссийская конференция "Современная звездная астрономия" 15 — 16 июня 2011 г. Москва, ГАИШ МГУ;
- 41-я международная студенческая конференция: "Физика космоса" 30 янв — 03 февр. Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 2012 г.
- Международная конференция: "Galaxies: origin, dynamics, structure and astrophysical disks", 14 — 18 мая 2012, Сочи.
- Всероссийская конференция: "Физика космоса, структура и динамика планет и звездных систем" 14 — 16 ноября 2012 г. УдГУ, Ижевск.
- 42-я международная студенческая конференция: "Физика космоса" 28 янв — 01 февр. Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 2013.
- 43-я международная студенческая конференция: "Физика космоса" 03 — 07 февраля. Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 2014.

Структура и объём диссертации

Диссертация содержит введение, основную часть из 5 разделов, заключение, список литературы, составленный в алфавитном порядке и приложение. Общий объём диссертации составляет 157 страниц (с приложениями), включая 25 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* обосновываются актуальность темы, научная новизна, научная и практическая ценность работы, формулируются основные цели работы, основные положения и результаты, выносимые на защиту, перечисляются публикации, содержащие результаты диссертации, а также семинары и конференции, на которых докладывались основные результаты, указан личный вклад автора.

В первом разделе: *Обзор публикаций, посвященных динамике РЗС*, кратко изложены основные результаты по исследованию динамики РЗС или представляющие важность для этих исследований.

Во втором разделе: *Параметры нестационарности РЗС* выполнены оценки ряда динамических параметров (контрасты плотностей в ядрах скоплений, дисперсии скоростей движения звезд в ядрах с учетом влияния на скопления внешнего поля Галактики и нестационарности скоплений и другие) для 87 РЗС с известными структурными параметрами. Показано для выборки из 103 РЗС каталога из работы Данилова и Селезнева [12], что использование распределения Кинга пространственной плотности звезд для оценки числа звезд скопления приводит к систематическому занижению числа звезд по сравнению с данными звездных подсчетов. Для рассмотренной выборки из 103 РЗС число звезд скопления, получаемое с помощью распределения Кинга, составляет от полного числа звезд скопления в среднем величину 0.62 ± 0.02 . Показано, что влияние силового поля Галактики и нестационарности скопления увеличивает дисперсию скоростей звезд в РЗС σ_v^2 в среднем в 1.3—1.4 раза по сравнению с оценками σ_v^2 для изолированных вирialized скоплений. Следовательно, вирiальные массы РЗС, полученные по данным наблюдений о скоростях движения звезд без учета влияния внешнего поля Галактики на скопление, являются завышенными оценками динамических масс РЗС в среднем в 1.3—1.4 раза. Для сферических моделей скоплений получены аналитические решения уравнений гросс-динамики. Рассматривались гомологичные колебания моделей для следующих распределений массы: с

плотностью $\rho(r) = \text{const}$, $\rho(r) \sim 1/r^2$, $\rho(r) = f_k(r) + \text{const}$, где $f_k(r)$ — распределение Кинга пространственной плотности звезд и негомомогичные колебания в модели из двух однородных шаров с общим центром масс, имитирующих гало и ядро скопления. Показано, что решения уравнений гросс-динамики, описывающих негомомогичные колебания модели со структурой ядро-гало дают оценки амплитуды колебаний вириального коэффициента, согласующиеся с оценками этой величины, полученными ранее Даниловым и Селезневым [12] из других соображений. Эти решения использованы для оценок ряда величин, характеризующих степень нестационарности скопления (среднее значение вириального коэффициента скопления, амплитуда колебаний вириального коэффициента скопления, амплитуда колебаний радиуса ядра скопления, периоды колебаний скопления и ядра скопления и др.), большая часть которых ранее не определялась.

В третьем разделе: *Динамика корреляций между параметрами движения звезд в моделях рассеянных звездных скоплений* рассмотрены двухвременные и двухточечные корреляции для ряда параметров движения звезд, а также для плотности и фазовой плотности в окрестностях этих звезд в моделях рассеянных звездных скоплений. Определены времена и радиусы корреляций для указанных параметров. Показано, что в процессе эволюции модели с наибольшей степенью нестационарности быстрее всего разрушаются корреляции в пространстве величины скорости v , а медленнее всего — в пространстве величин энергии ϵ . Анализ двухточечных корреляций приводит к выводу о существовании волн плотности n , потенциала ϵ и фазовой плотности f в моделях РЗС. Длины этих волн равны расстояниям, для которых величины двухточечных корреляций достигают локальных максимумов. Вычислены распределения корреляций по величинам корреляций в пространствах величин плотности и фазовой плотности. Исследована динамика таких распределений. Показано нарастание корреляций со временем в половине из рассмотренных моделей РЗС. Исследованы потоки корреляций в пространстве величин корреляций фазовой плотности. Обнаружен доминирующий поток корреляций из области больших по модулю корреляций в область малых по модулю корреляций. Показано, что такой поток приводит к появлению потока кинетической энергии к центру скопления. Получены оценки скорости нагрева ядер скоплений dT/dt таким потоком. Чем больше степень нестационарности модели скопления, тем больший вклад в нагрев центральных областей модели РЗС вносят колебания регулярного поля по сравнению с нагревом $dT_{\text{н}}/dt$ за счет звездных сближений. Обнаружены признаки слабой турбулентности в

движениях звезд ядра в модели РЗС с наибольшей степенью нестационарности: отношение кинетической энергии коллективных движений к кинетической энергии тепловых движений $T_c/T_h = 0.22 \pm 0.02$, $(dT/dt)/(dT_h/dt) = 8.1 \pm 1.5$.

В четвертом разделе: *Корреляционный и спектральный анализ колебаний фазовой плотности в моделях рассеянных звездных скоплений* вычислены двухвременные корреляции между величинами фазовой плотности и определены времена корреляции колебаний фазовой плотности. По данным о двухчастичных корреляциях, полученных в третьем разделе, и двухвременных корреляциях вычислены средние фазовые скорости распространения таких колебаний в моделях скоплений. Эти скорости в 2—20 раз меньше среднеквадратических скоростей движения звезд в ядре скопления в зависимости от модели РЗС (относительная величина фазовой скорости волн f падает с увеличением степени нестационарности модели РЗС). Для анализа колебаний фазовой плотности адаптирован корреляционный метод анализа неустойчивых колебаний плазмы [13]. Вычислены средние (для 10 расстояний r от центра скопления) взаимные корреляционные функции $C_{12}(\tau, r)$ между флуктуациями фазовой плотности f в центре модели скопления и в точках (зондах), равномерно распределенных на окружающих его сферических поверхностях радиуса r , где τ — временная задержка. Рассмотрены несколько моделей скоплений. Обнаружен ряд локальных экстремумов функции $C_{12}(\tau, r)$ в точках $\tau_j = P_j$, выходящих за пределы погрешностей величин $C_{12}(\tau, r)$, что указывает на существование повышенных взаимных корреляций (разного знака) между колебаниями f с периодами P_j в центре скопления и на расстоянии r от его центра. Взаимные корреляционные функции использованы для вычисления спектров мощности и дисперсионных кривых колебаний фазовой плотности. Обнаружен ряд локальных максимумов спектра мощности S_ν , выходящих за пределы погрешностей вычисления спектра, что указывает на повышенные мощность и интенсивность возбуждения колебаний f с частотами ν из окрестностей точек локальных максимумов S_ν . Подтверждено наличие известных неустойчивых колебаний фазовой плотности в ядрах моделей скоплений, связанных с гомологическими колебаниями ядер. Обнаружен ряд новых неустойчивых колебаний фазовой плотности в этих моделях. Многократные изменения знака $k_\perp$ на дисперсионных кривых указывают на формирование в моделях РЗС ряда встречных бегущих радиальных волн фазовой плотности. Наличие большого числа неустойчивых колебаний величин f , а также повышенные мощность и, следовательно, интенсивность

возбуждения таких колебаний в модели 1 с наибольшей степенью нестационарности рассматриваются как аргументы в пользу турбулентности, развивающейся в модели скопления. Вычислены средние (для 10 расстояний r от оси модели скопления) взаимные корреляционные функции между флуктуациями фазовой плотности в точках на оси модели скопления и в точках на окружающих ее цилиндрических поверхностях радиуса r . Проведено сравнение спектров мощности и дисперсионных кривых, полученных в результате Фурье-преобразования взаимных корреляционных функций, полученных при использовании сферических и цилиндрических поверхностей, на которых размещаются зонды. Показано, что частоты волн фазовой плотности почти не зависят от способа выбора точек для расчета взаимных корреляционных функций. Дисперсионные кривые заметно меняются, что объясняется наличием фазового сдвига между колебаниями фазовой плотности при использовании разных поверхностей. Результаты расчетов корреляционных функций, спектров мощности и дисперсионных кривых при использовании фазовых координат звезд, полученных численно в [7] разностными методами 10-го и 11-го порядков точности практически совпадают.

В пятом разделе: *Сглаживание силовых функций и спектры колебаний модели рассеянного звездного скопления* исследуется влияние изменения параметра сглаживания ε^* силовых функций в уравнениях движения звезд скопления на вычисляемые характеристики модели РЗС и выполнен корреляционный и спектральный анализ колебаний фазовой плотности и потенциала в модели РЗС при разных значениях параметра сглаживания. Рассматривались значения ε^* из интервала $[0.8\varepsilon_1^*; 2.2\varepsilon_1^*]$, где $\varepsilon_1^* = 0.012\langle r_y \rangle$, $\langle r_y \rangle$ – среднее начальное расстояние между звездами. Показано, что при увеличении ε^* в два раза в сравнении с ε_1^* степень нестационарности модели РЗС скопления практически не изменяется, в ядре модели заметно убывают суммарная кинетическая энергия звезд K (в 1.2-1.8 раза), число звезд N (в 1.1-1.4 раза), концентрация звезд ρ (в 1.14-1.35 раза) и средний квадрат скорости движения звезд T (в 1.07-1.13 раза). Вычислены взаимные корреляционные функции для флуктуаций потенциала U для разных расстояний от его центра. Для вычисления спектров мощности и дисперсионных кривых колебаний значений U использовалось Фурье-преобразование взаимных корреляционных функций. Спектр колебаний U оказался более простым в сравнении со спектром колебаний фазовой плотности. Основные по мощности колебания U связаны с колебаниями f и расположены на низких частотах $\nu < 3/\tau_{vr}$. На средних и высоких частотах $\nu > 3/\tau_{vr}$ вклад колебаний U в формирование

колебаний f мал или равен нулю. Исследованы зависимости спектров и дисперсионных кривых колебаний f и U от величины параметра сглаживания. Вычислены "наклон" q спектра и его зависимость от ε^* , а также коэффициенты корреляции между спектрами колебаний f в модели скопления с разными ε^* . Обнаружены "повторяемость" (значительная коррелированность) спектров при некоторых значениях ε^* и неустойчивость формы дисперсионной кривой к малым изменениям параметра сглаживания. Основной причиной резких изменений q при малых изменениях ε^* является смена встречных бегущих волн колебаний f (и U) на низких частотах на волны, бегущие в одном направлении по r . Обнаруженные особенности в спектрах и дисперсионных кривых колебаний f , по-видимому, связаны с существованием определенных соотношений между размерами скопления и длинами стоячих и бегущих волн в скоплении, обусловлены дискретностью длин волн (и фаз колебаний в волнах), формирующихся в скоплении с конечными размерами в направлении распространения волн. Детальное исследование радиальных профилей плотности и скоростей движения звезд ряда РЗС из [12] способно дать необходимые данные о длинах волн плотности и фазовой плотности в этих скоплениях, а также позволит оценить соотношения между длинами этих волн и размерами скоплений (и ядер скоплений). Сравнение этих оценок с результатами численного моделирования динамики РЗС позволит сделать выводы о возможности квантования волн плотности и фазовой плотности в наблюдаемых звездных скоплениях.

В *Заключении* диссертации перечислены основные итоги данной работы.

В *Приложении* приведены начальные параметры моделей РЗС, используемых в данной работе; результаты обработки двухвременных и двухточечных корреляционных функций для ряда параметров движения звезд, а также для плотности и фазовой плотности в моделях РЗС; результаты расчетов периодов неустойчивых колебаний фазовой плотности и времен нарастания амплитуд таких колебаний в e раз в моделях РЗС; результаты расчетов динамических характеристик 87 РЗС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ общим объемом 5 печатных листов, в том числе 5 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций; 7

работ опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов; имеется 4 публикации в электронных научных изданиях.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Данилов В. М., Путков С. И. Параметры нестационарности рассеянных звездных скоплений // *Астрономический Журнал* – 2012. – Т. 89. – № 8. – С. 674-688.
2. Данилов В. М., Путков С. И. О динамике корреляций в моделях рассеянных звездных скоплений // *Астрономический Журнал* – 2012. – Т. 89. – № 8. – С. 689-704.
3. Данилов В. М., Путков С. И. Корреляции, спектры и неустойчивость колебаний фазовой плотности в моделях рассеянных звездных скоплений // *Астрофизический Бюллетень* – 2013. – Т. 68. – № 2. – С. 163-177.
4. Данилов В. М., Путков С. И. Корреляции и неустойчивости колебаний фазовой плотности в моделях рассеянных звездных скоплений // *Вестник УдГУ, серия Математика. Механика. Компьютерные науки.* – 2013. – Вып. 2. – С. 65-73.
5. Данилов В. М., Путков С. И. Сглаживание силовых функций и спектры колебаний модели рассеянного звездного скопления // *Астрофизический Бюллетень* – 2014. – Т. 69. – № 1. – С. 28-41.

Цитируемая литература

1. Антонов В. А., Нуритдинов С. Н. Нелинейные колебания некоторых однородных моделей звездных систем. I. Случай радиальных колебаний // *Вестник Ленинградского университета.* – 1973. – № 7. – С. 131-138.
2. Ossipkov L. P. Gross-Dynamics of Open Clusters in the Galaxy // *Dynamics of Star Clusters and the Milky Way. ASP Conference Series.* – 2001. – V. 228. – P. 341-346.
3. Danilov V.M. Analysis of density fluctuations in models of open clusters // *Astron. Rep.* – 2008. – V. 52. – P. 888-899.
4. Goodman J., Heggie D. C., Hut P. On the Exponential Instability of N-Body Systems // *Astrophys. J.* – 1993. – V. 415. – P. 715-733.
5. Kandrup H. E., Mahon M., E., Haywood S. Jr. On the sensitivity of the N-body problem toward small changes in initial conditions. 4 // *ApJ.* – 1994. – V. 428. – P. 458-465.

6. Komatsu N., Kiwata T., Kimura S. Numerical irreversibility in self-gravitating small N-body systems // *Physica A*. – 2008. – V. 387. – P. 2267-2278.
7. Danilov V.M., Dorogavtseva L.V. Timescales for mechanisms for the dynamical evolution of open star clusters // *Astron. Rep.* – 2008. – V. 52. – P. 467-478.
8. Холопов П. Н. Звездные скопления. – М.: Наука, 1981. – 480 с.
9. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика. – М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. – 312 с.
10. Kandrup H.E. Collisionless Relaxation in Galactic Dynamics and the Evolution of Long-Range Order // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 1998. – V. 848. – P. 28-47.
11. Chavanis P.H. Hamiltonian and Brownian systems with long-range interactions: IV. General kinetic equations from the quasilinear theory // *Physica A*. – 2008. – V. 387. – P. 1504-1528.
12. Danilov V. M., Seleznev A. F. The catalogue of structural and dynamical characteristics of 103 open star clusters and the first results of its investigation // *Astron. and Astrophys. Transactions*. – 1994. – V. 6. – P. 85-156.
13. Бернар М., Бриффо Ж., Бюссак Ж., Франк Р., Грегуар М., Тузо М., Вайс Ж. Корреляционные методы анализа плазменных экспериментов // *Диагностика плазмы*. – М.: Атомиздат. – 1973. – Вып. 3. – С. 449-460.

Путков Станислав Игоревич

Исследование динамических характеристик рассеянных звездных скоплений.

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Подписано в печать 18.06.2014. Заказ № 18481

Формат 145x205 мм. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография: Копировальный центр «Таймер»,

Екатеринбург, ул. Луначарского, 136