

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
Механико-математический факультет

На правах рукописи

Шувалова Анна Игоревна

**Аналитические и численные исследования
движения пылевых частиц
в Солнечной системе**

Специальность 01.02.01 — теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2016

Работа выполнена на кафедре теоретической механики и мехатроники механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: Сальникова Татьяна Владимировна,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Степанов Сергей Яковлевич,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: Иванов Александр Павлович,
доктор физико-математических наук,
профессор,
заведующий кафедрой теоретической
механики Московского
физико-технического института
(государственного университета)

Родников Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук,
доцент,
доцент кафедры "Вычислительная
математика и математическая физика"
Московского государственного
технического университета
имени Н.Э. Баумана

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет

Защита диссертации состоится 17 июня 2016 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.22, созданного на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: Ломоносовский проспект, д. 27, и на сайте <http://mech.math.msu.su/~snark/files/diss/0116diss.pdf>

Автореферат разослан 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Прошкин Владимир Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Задача трех тел является классической задачей небесной механики. Круговая ограниченная постановка задачи, как известно, допускает пять положений относительного равновесия, два из которых – треугольные точки либрации L_4 и L_5 – при определенном соотношении главных притягивающих масс обладают устойчивостью по Ляпунову. Решение этой задачи было завершено в семидесятые годы XX века. Среди основных исследователей стоит выделить А.М. Леонтовича и А.П. Маркеева. Задача в ограниченной постановке обычно обсуждается на примере задачи Солнце – Юпитер – Астероид. Для данной системы впервые было открыто существование астероидов в окрестности треугольных точек либрации. Такие астероиды были названы Троянскими. На начало 2016 года известно о более чем 6300 троянских астероидах Юпитера. Также были найдены Троянцы и для других планет Солнечной системы. В 2010 году Троянский астероид был обнаружен для системы Солнце – Земля. Гипотезы о существовании астероидов или даже скоплений астероидов в задаче с моделью, не являющейся точной для тел Солнечной системы, привели к многочисленным астрономическим находкам, база которых пополняется каждый год.

Вопросам теоретического обоснования существования в космическом пространстве областей скопления метеоритов и метеоритной пыли посвящена обширная литература, однако до сих пор остается много неразрешенных проблем. В частности, на протяжении более пятидесяти лет ведется научная дискуссия о существовании в окрестности треугольных точек либрации системы Земля – Луна космических пылевых облаков Кордылевского.

Для системы Земля – Луна треугольные точки либрации обладают устойчивостью по Ляпунову. Их окрестность являлась объектом наблюдения

для астрономов многие годы, но первые успешные наблюдения и фотографические подтверждения получил польский астроном К. Кордылевский. Его успех объясняется сменой стратегии наблюдения: вместо объектов, подобных астероидам, Кордылевский искал светящееся скопление частиц космической пыли. Открытие подверглось критике. Многие профессиональные астрономы и любители терпят неудачи в наблюдениях и, как следствие, считают результаты Кордылевского ошибочными. Дальнейшие исследования показали, что точки либрации системы Земля – Луна теряют устойчивость, если учитывать гравитационное действие Солнца. В фотогравитационной задаче, то есть в задаче, где учитывается не только сила притяжения Солнца, но и световое давление, также была показана неустойчивость треугольных точек либрации. При этом некоторые астрономы подтверждали наблюдения Кордылевского, получали фотографические доказательства. Объяснение феномена непостоянства наблюдения пылевых скоплениях пришло к версии, что облака Кордылевского обладают нестабильностью: под действием возмущающих сил часть пыли уходит, на ее место приходят новые частицы.

Существование скоплений космической пыли в околоземном пространстве должно учитываться в космических миссиях. Столкновение космического аппарата с облаком пылевых частиц может стать трагическим концом миссии. Таким образом, исследование динамики ансамбля частиц в околоземном пространстве представляется весьма актуальным.

Цель работы. Диссертация посвящена теоретическому исследованию динамики областей скопления космических пылевых частиц и астероидов в Солнечной системе. Рассмотрены различные возмущающие факторы, влияющие на относительные равновесия и периодические движения частиц.

Методы исследования. Исследование проводится с использованием известных аналитических и численных методов аналитической механики,

небесной механики, теории устойчивости движения и дифференциальных уравнений.

Достоверность результатов. Часть результатов диссертации получена аналитически. Часть результатов получена с помощью методов численного анализа. Результаты носят теоретический характер. Они получены в рамках четко сформулированных моделей движения космических частиц. Полученные результаты сопоставлены и подтверждаются имеющимися в литературе данными астрономических наблюдений.

Научная новизна. Основные результаты диссертации являются новыми. Впервые использован метод интегрирования уравнений Лиувилля для получения статистической картины в поставленной задаче небесной механики.

Теоретическая и практическая ценность. Диссертация носит теоретико-прикладной характер. Описанные в работе результаты помогают прогнозировать местоположение, размеры и распределение частиц по фракциям для скоплений космической пыли в околоземном пространстве. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях, проводимых в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете), в Математическом институте им. В.А. Стеклова РАН, в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Институте космических исследований РАН и других научно-исследовательских центрах.

Личный вклад. Научные руководители предложили постановку задачи и методы ее исследования, а также консультировали соискателя в процессе выполнения работы. Все представленные в диссертации результаты получены лично соискателем.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались автором и обсуждались на следующих конференциях и научных семинарах:

- IAU-Symposium: Complex Planetary Systems 07-11 July 2014, Namur, Belgium, Namur, Belgium, Бельгия, 2014;
- XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20-24 августа 2015 г.);
- Международная конференция по математической теории управления и механике (03–07 июля 2015 г., г. Суздаль, Владимирская обл.);
- Конференция-конкурс молодых ученых НИИ механики МГУ. 12-13 октября 2015 г., НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 12-14 октября 2015;
- Научный семинар отдела механики ВЦ им.А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН под руководством зав.отд. С.Я. Степанова, с.н.с. А.А.Бурова (2015);
- Семинар "Гамильтоновы системы и статистическая механика" под руководством акад. РАН, проф. В.В.Козлова; чл.-корр. РАН, проф. Д.В.Трещева; проф. С.В.Болотина (2015);
- Семинар по аналитической механике и теории устойчивости (имени В.В.Румянцева) под руководством чл.-корр. РАН, проф. В.В.Белецкого; проф. А.В.Карапетяна (2016);
- Семинар "Механика космического полета (имени В.А.Егорова)" под руководством чл.-корр. РАН, проф. В.В.Белецкого; проф. В.В.Сазонова (2016);

- Заседание секции теоретической механики имени профессора Н.Н. Поляхова Санкт-Петербургского Дома Ученых РАН (2016).

Автор награжден дипломом III степени за лучшую работу аспиранта Конференции-конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ (2015).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в трех печатных работах. Одна статья размещена в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК Минобрнауки РФ. Одна статья входит в базу Astrophysics Data System. Работы выполнены в соавторстве с научными руководителями к.ф.-м.н. Сальниковой Т.В., д.ф.-м.н. Степановым С.Я., которым принадлежат постановки задач и методы их исследования, а также научные консультации в процессе исследования. Также список работ включает в себя опубликованные тезисы конференций и аннотации докладов.

Список работ приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации — **73** страницы текста. Список литературы содержит **55** наименований. В диссертации приведено **22** рисунка.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, дан обзор литературы по теории орбит в окрестности треугольных точек либрации и по наблюдению пылевых облаков в окрестности треугольных точек либрации системы Земля – Луна — облаков Кордылевского. Приведено основное содержание работы и апробации.

Первая глава состоит из двух разделов, объединенных тематикой возмущающих эффектов в системе Земля – Луна.

В первом разделе первой главы рассмотрен случай плоской круговой ограниченной задачи трех тел на примере системы Земля – Луна – точечная масса, где гравитационные потенциалы Земли и Луны заданы как потенциалы М.Д.Кислика. Потенциал Кислика позволяет принять во внимание сплюснутость у полюсов притягивающего тела. Модель потенциала рассмотрена как упрощенный случай потенциала, предложенного В.Г.Деминым, Е.П.Аксеновым, Е.А.Гребениковым: потенциал двух неподвижных материальных точек одинаковой массы на мнимом расстоянии

$$V = -\frac{\gamma m}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad r_{1,2} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z \pm ci)^2}$$

где γ – гравитационная постоянная, m – полная масса притягивающего тела, c – константа, характеризующая сжатие тела относительно экватора.

Найдены положения относительного равновесия для точечной массы и проанализирована их устойчивость.

Во втором разделе рассмотрена оценка возмущения периодических траекторий в окрестностях треугольных точек либрации при учете факторов, связанных с наклоном орбиты, эллиптичностью траекторий основных притягивающих тел. Построены уточненные орбиты.

Вторая глава посвящена статистическому обоснованию формирования скоплений частиц и астероидов. Рассматривается плоская круговая ограниченная задача трех тел Земля – Луна – Частица с учетом периодического возмущения от Солнца. В задаче для каждой из лагранжевых точек либрации существуют две охватывающие их устойчивые периодические орбиты. Из устойчивости периодического решения следует, что при малых отклонениях координат и скоростей от периодического движения, можно рассмотреть ансамбль частиц, которые будут оставаться в окрестности этого периодического движения. Чтобы оценить вероятность образования космических пылевых

облаков рассматривается уравнение Лиувилля:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \dot{u} \frac{\partial \rho}{\partial u} + \dot{v} \frac{\partial \rho}{\partial v} = 0.$$

Уравнение Лиувилля описывает временную эволюцию функции распределения пылевых частиц $\rho(x, y, u, v, t)$ в фазовом пространстве, не взаимодействующих с другими такими же частицами. Для проверки алгоритма построены модели для расчета плотностей в окрестности треугольной точки либрации круговой ограниченной задачи трех тел (аналогия с Троянскими астероидами, распределение которых можно наблюдать визуально). Для области фазового пространства подсчитана грубая энтропия.

В третьей главе рассмотрена задача поиска периодических решений в окрестности треугольных точек либрации системы Земля – Луна – Частица при учете светового давления и гравитационного возмущения от Солнца. Световое давление задается через понижающий коэффициент $(1 - \varepsilon)$ перед силой гравитационного притяжения Солнца. Вычислены значения понижающего коэффициента в зависимости от параметров Частицы. Построены бифуркационные диаграммы зависимости начальных условий периодических траекторий Частицы от параметра, характеризующего световое давление. Исследована их устойчивость. Оказывается, что существует множество устойчивых в первом приближении периодических траекторий, соответствующих небольшим значениям параметра ε .

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты

- В плоской круговой ограниченной задаче трех тел Земля – Луна – Частица вычислена величина смещения треугольных точек либрации при учете сплюснутости формы Земли и Луны с заданием их гравитационных потенциалов в форме потенциала Кислика. Выписано необходимое условие устойчивости для треугольных точек либрации.
- Исследованы свойства периодических орбит и динамика частиц в их окрестности, обусловленные гравитационным периодическим возмущением от Солнца. Получены оценки возмущенного движения частиц при учете пространственных возмущений от наклона и эллиптичности орбит основных тел.
- Получены значения функции распределения в окрестности треугольных точек либрации в круговой ограниченной задаче трех тел Солнце – Юпитер – Частица.
- Построены картины распределения плотности частиц в окрестности устойчивого периодического движения в круговой ограниченной задаче трех тел Земля – Луна – Частица с учетом возмущения от Солнца (облака Кордылевского).
- Численно найдены основные периодические орбиты в окрестности треугольных точек либрации системы Земля – Луна – Частица при учете светового давления и гравитационного возмущения от Солнца.
- Определены условия устойчивости в линейном приближении периодических траекторий. Построены бифуркационные диаграммы зависимости начальных условий для периодических движений от параметра ε , характеризующего световое давление.

Публикации автора по теме диссертации

1. Salnikova T., Shuvalova A. The special case of the three body problem, when gravitational potential is given as the Kislak potential // ISSN 1743-9213. Complex Planetary Systems. Proceedings of the International Astronomical Union. Cambridge University Press. – 2014. – Vol. 9, no. 310. – P. 45-48.
2. Сальникова Т.В., Степанов С.Я., Шувалова А.И. Вероятностная модель облаков Кордылевского // Доклады РАН. – 2016. – Т.468, №3. – С. 24-29.
3. Шувалова А.И. О вероятностной модели космических пылевых облаков Кордылевского // Тезисы конференции-конкурса молодых ученых Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова. 12-14 октября 2015 года.
4. Шувалова А.И. Об уравнениях Лиувилля для космических пылевых облаков Кордылевского // Международная конференция по математической теории управления и механике. Тезисы докладов. (03-07 июля 2015 г., г. Суздаль, Владимирская обл.). М.: МИАН. – 2015. – С. 152.
5. Шувалова А.И. О периодических орбитах частицы в системе Земля-Луна-Солнце // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. (Казань, 20-24 августа 2015 г.). – Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета Казань. – 2015. – С. 312-312.
6. Шувалова А.И. О периодических орбитах частицы в системе Земля-Луна-Солнце // Сборник трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20-24 августа 2015 г.). – Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета Казань. – 2015. – С. 4262-4263.