

0. 776963

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Орлов Сергей Алексеевич

**СТРОЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ,
СВЯЗАННЫХ СО СПУТНИКАМИ ПЛАНЕТ**

Специальность 01.03.01 - астрометрия и небесная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Холшевников Константин Владиславович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Шмыров Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук
Железнов Николай Борисович

Ведущая организация: Уральский государственный университет,
Екатеринбург

Защита состоится 26 мая 2009 г. в 15 ч. 30 м. на заседании совета Д 212.232.15 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр. 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000556105

Автореферат разослан 21 апреля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Орлов В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Проблема космического мусора как естественного, так и техногенного происхождения занимает важное место в научных исследованиях и уже длительное время привлекает пристальное внимание специалистов. В результате различных процессов в окрестности планеты образуются кольца (или более сложные структуры), состоящие из твердых обломков, движущихся вокруг планеты с большими скоростями.

Существует, как минимум, две причины появления таких образований: природная (например, в случае бомбардировки метеоритами естественного маломассивного спутника) и техногенная (в случае распада искусственного спутника Земли). Природные пылевые комплексы давно известны в системе Сатурна, а в космическую эру они открыты в системах всех планет-гигантов. Есть веские основания считать, что метеорные рои присутствуют и в системе Марса, обладающего двумя маломассивными спутниками. В 1960-е гг. обнаружилось, что взрыв ИСЗ, а также столкновение двух ИСЗ ведут к образованию роя осколков, напоминающего пылевой рой вокруг орбит естественных спутников. Со времени начала освоения околоземного пространства произошло множество событий, ведущих к появлению обломков космических аппаратов. Из последних крупных таких событий стоит отметить намеренное уничтожение китайского спутника Feng Yun-1C („Фэн юнь“ — „Ветер и облако“) 11 января 2007 г., а также столкновение и разрушение российского и американского спутников („Космос“ — „Iridium“) 10 февраля 2009 г.

Исследуемая проблема имеет пересечения и с другими родственными задачами, как например, образование связанных с кометами метеорных роев [2, 3, 11, 12], определение области достижимости в астродинамике [6] и др.

Опишем кратко предложенный впервые С.Сотером [18] механизм образования роя метеорной материи в окрестности спутника типа Фобоса. Время от времени на спутник падают метеориты с характерными скоростями порядка 10 км/с.образова-

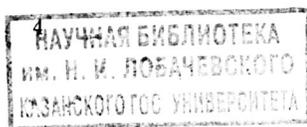
ние кратера сопровождается выбросом вещества, по массе на несколько порядков превосходящего массу ударника [1]. Поэтому характерные скорости выброса частиц значительно меньше скорости ударника, но из-за малости массы спутника большинство частиц приобретает скорости, превышающие параболическую. Таким образом, вещество поступает в космос и остается на орбитах, близких к орбите спутника. Множественность ударов в совокупности с действием возмущающих сил приводит к образованию эллипсоидального тора с осевой линией вдоль орбиты спутника.

Вторая космическая скорость на Фобосе составляет порядка 10 м/с, так что практически все вещество выбрасывается в космос и остается на ареоцентрической орбите, близкой к орбите Фобоса. После каждого удара выброшенные частицы зачерчивают семейство эллипсов с общей линией узлов, образующее топологический тор переменного сечения с точечной перетяжкой в месте выброса и перетяжкой в виде отрезка с обратной от Марса стороны. Возмущения от сжатия Марса и от Солнца ведут к исчезновению перетяжек и превращению роя метеороидов за год-два в тор приблизительно эллипсоидального сечения с осевой линией вдоль орбиты Фобоса. Поскольку бомбардировка Фобоса происходит постоянно, в различных его точках, образование усредненного полнотория происходит еще быстрее.

По мере накопления вещества в рое вступает в действие механизм вычерпывания. Частицы снова падают на спутник, но уже с малыми скоростями, и вторичные выбросы практически отсутствуют. В результате одновременного протекания двух процессов в рое устанавливается динамическое равновесие. Очевидно, плотность равновесного роя выше межпланетной [8].

Опубликовано много работ по указанной теме, в которых исследуются различные возмущения, вызванные сжатием центрального тела, притяжением Солнца, других планет и спутников, световым давлением, магнитным полем и т.д. Подавляющее большинство этих работ ограничивается либо качественным подходом [15, 16], либо численным, давая приближенное решение на ограниченном временном интервале [5, 10, 4, 14].

Мы рассматриваем относительно крупные частицы с массой более 10^{-7} г. Поведение более мелких в значительной степе-



ни определяется электромагнитным взаимодействием с фотонным и корпускулярным солнечным излучением. Как показано в работах [18, 8], механизм выметания крупных частиц световым давлением с учетом эффекта Пойнтинга-Робертсона, а также механизм взаимных соударений, приводящий к уплотнению тора и образованию кольца, не играют роли на временах порядка сотни лет, которыми мы здесь ограничимся. Орбиту спутника — источника частиц считаем круговой, что допустимо в большинстве приложений.

Цели работы

Рассматривалось три типа задач: случай невозмущенного движения; случай возмущенного движения, при котором спутник находится в плоскости экватора планеты; случай возмущенного движения, при котором орбита спутника имеет ненулевой наклон к плоскости экватора планеты.

В данной работе были определены следующие основные цели:

- Определение точной границы области возможных движений частиц и ее исследование.
- Исследование формы облака частиц на начальном этапе формирования и в процессе эволюции.
- Получение профиля плотности роя частиц внутри границы их возможных движений.

Научная новизна

Представляемая здесь работа призвана восполнить недостающие знания о возникновении пылевых комплексов, об их формировании и эволюции. Основным объектом поиска и исследования является граница пылевого образования. Метод получения решения в данной работе является аналитическим. Новый подход заключается в применении методов дифференциальной геометрии для поиска границы пылевого комплекса, с учетом законов движения тел в небесной механике.

Предлагается следующая постановка задачи: Спутник O_1 движется по круговой кеплеровой орбите вокруг планеты O со скоростью w . В некоторый момент t_0 из O_1 происходит изотропный выброс частиц бесконечно-малой массы с одинаковой относительно O_1 скоростью b . Орбита родительского спутника O_1 либо расположена в плоскости экватора планеты (случай нулевого наклона), либо повернута относительно этой плоскости на некоторый угол (случай ненулевого наклона).

Новым является:

— разработка аналитического метода поиска границы пылевого комплекса как огибающей семейства траекторий его частиц;

— успешное применение метода для нахождения границы пылевого комплекса в трех классах задач (невозмущенный случай, возмущенный случай с нулевым наклоном и возмущенный случай с произвольным наклоном) и исследование топологических и геометрических свойств границы;

— исследование аналитическими методами поведения частиц в момент рождения пылевого комплекса и в процессе его дальнейшей эволюции.

Практическая значимость работы

Проведенная работа позволила определить искомую границу, детально рассмотреть ее структуру и строение, а также выявить интересные научные факты, как например, то, что невозмущенные орбиты экстремального наклона расположены целиком на границе области невозмущенного движения. Впервые разработана методика получения точной границы области возможных движений частиц. Она успешно апробирована на трех типах задач и может быть применена и в более сложных случаях, чем те, которые рассмотрены в диссертации.

Аналитические результаты сравнивались с численными, проведенными в этой же работе, а также и с работами других авторов. Сравнение показало впечатляющее сходство результатов, по крайней мере на качественном уровне.

Фиксирование скорости выброса влечет появление общего для всех частиц *параметра выброса* c , равного отношению

спутникоцентрической скорости частиц к планетоцентрической скорости спутника, а также еще двух сферических координат направления выброса — долготы λ и дополнения до широты θ . Эти параметры составляют минимально необходимый и при этом достаточный набор величин, с помощью которых можно описать семейства орбит. Элементы орбит частиц явно выражаются через три указанные величины.

Стоит отметить, например, работу [17], в которой объектом исследования является метеорный поток Геминиды. Схема образования потока, предложенная автором данной статьи, более сложная, но все же подходит под наше исследование. В этой работе проводится процесс численного моделирования движения фрагментов распада астероида 3200 Фаэтон и строится область их возможных движений. Предполагается, что распад произошел на короткой дуге вблизи перицентра орбиты. Форма и размеры образовавшегося потока весьма напоминают описанные в главе 1 диссертации. Интересен следующий факт: время жизни невозмущенного тора частиц как единого объекта невелико. Если за характерный размер данного пылевого образования принять радиус орбиты астероида, то это время оценивается в десятки или сотни оборотов. Кроме того, факт одномоментного распада конкретного естественного объекта маловероятен, однако с учетом огромного числа известных малых тел Солнечной системы подобные события отнюдь не редки. Согласно [9] в настоящее время известно 208 тысяч нумерованных и 233 тысячи нумерованных астероидов, 214 нумерованных короткопериодических и 4000 долгопериодических комет, 162 спутника планет и 45 наблюдаемых метеорных потоков.

Метеорный поток (точнее, его построенная модель) является удачным примером наглядной демонстрации результатов главы 1. Он продолжительное время может сохранять свою форму, вследствие того, что все возмущающие факторы (сжатие Солнца и притяжение других планет), влияющие на ее изменение, малы и проявляются лишь в течение длительного времени воздействия.

В работе [8], где речь идет о выбросах из Фобоса и формировании тороидальной пылевой области, размеры сечения тора оцениваются и составляют 0.3×1.5 Мм. Т.е. отношение по-

луосей составляет $1 : 5$. Перейдя к безразмерным величинам, выразив размеры в радиусах орбиты Фобоса (≈ 9.3 Мм) получим отношение $0.161 : 0.032$. Пользуясь выводами, сделанными в нашей работе, получим, что характерное значение параметра выброса при формировании пылевого комплекса Фобоса равно 0.02 . При этом параметре, согласно нашей теории, отношение полуосей должно составлять $0.16 : 0.04$. Небольшое различие в этих результатах свидетельствует, скорее всего, о гравитационном влиянии Солнца и негравитационных эффектах, не учитываемых в нашей работе.

Сравнение с некоторыми другими работами показало, что и результаты, которые совпадают лишь на качественном уровне, представляют значительный интерес. Например, во второй главе линейные размеры, такие как внешний и внутренний радиусы, а также толщина области распространения частиц, получены точно, в рамках модели. В то же время, авторы многих работ, которые проводят похожие исследования с применением численных методов, подразумевающих богатый набор возмущающих факторов, получают пылевые образования, имеющие некоторые отличия от приведенных в работе (изменение размеров, нарушение симметрии). Эти расхождения позволяют оценить вклад неучтенных возмущений в общую эволюцию пылевых комплексов.

Апробация работы

Результаты представляемой работы докладывались на семинарах Кафедры небесной механики СПбГУ, семинаре ИПА РАН и семинаре ГАО РАН. Кроме того, они были представлены на следующих научных конференциях:

1. 30-я международная конференция „Физика Космоса“, г. Екатеринбург, 2001.
2. Всероссийская астрономическая конференция. г. Санкт-Петербург, Петергоф, 2001.
3. 31-я международная конференция „Физика Космоса“, г. Екатеринбург, 2002.

4. Fifth US-Russian Space Surveillance Workshop, 2003, Pulkovo, Russia.
5. 33-я международная конференция „Физика Космоса“, г. Екатеринбург, 2004.
6. 34-я международная конференция „Физика Космоса“, г. Екатеринбург, 2005.
7. Sixth US-Russian Space Surveillance Workshop, 2005, Pulkovo, Russia.
8. 35-я международная конференция „Физика Космоса“, г. Екатеринбург, 2006.
9. Астрономия-2006: традиции, настоящее и будущее. г. Санкт-Петербург, Петергоф, 2006.
10. 37-я международная конференция „Физика Космоса“, г. Екатеринбург, 2008.
11. Международная конференция „Динамика тел Солнечной системы“, г. Томск, 2008.

Положения, выносимые на защиту:

- ◆ создан и апробирован метод поиска границы области возможных движений частиц пылевого комплекса как огибающей семейства их траекторий;
- ◆ найдена граница пылевого комплекса в трех классах задач и исследованы ее топологические и геометрические свойства;
- ◆ установлена форма и динамика пылевого комплекса на начальном этапе разлета и в процессе эволюции.

По результатам исследования, приведенного в диссертации, опубликовано 5 научных работ. Диссертация изложена на 176 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемых литературных источников (45 наименований), 2 приложений, содержит 47 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** приводится обоснование актуальности работы, сформулированы цели, новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Проведен сравнительный анализ с некоторыми ключевыми работами других авторов. Приведены выносимые на защиту результаты, список публикаций и апробация работы.

В **первой главе** постулируется общая постановка задачи. Вводится обозначаемый через c *параметр выброса* частиц, равный отношению спутникоцентрической скорости частиц к планетоцентрической скорости спутника, а также сферические координаты θ , λ , определяющие направление выброса частицы.

Аналитическое исследование оказалось возможным, как обычно, при наложении некоторых упрощающих условий. Предполагается отсутствие негравитационных эффектов, отсутствие влияния частиц на движение других небесных тел, включая другие пылевые частицы. Модель выброса изотропна, орбита спутника, порождающего частицы, считается круговой. Частицы предполагаются движущимися по невозмущенным орбитам. При перечисленных ограничениях задача о поиске границы решается аналитически, что и показано в диссертации.

Проводится поиск элементов орбит частиц как функций от (c, θ, λ) , а затем границы области возможных движений в простейшем плоском случае, а также в пространственном невозмущенном случае. Граница области — двумерная замкнутая поверхность — представлена в параметрической форме. Описывающие ее функции двух пробегавших сферу переменных θ , λ и параметра c удалось выразить в элементарном виде. Для полноты картины и контроля вычислений приведены результаты работы [7]. Исследуются свойства найденной границы области, а также ее форма и динамика облака частиц на начальном этапе движения и в процессе эволюции. Приводятся сравнительные характеристики гипотетических взрывов низкоорбитальных искусственных спутников Земли, и выбросов с поверхности спутников Марса. Область невозмущенного движения частиц вместе с их орбитами приведена на рис. 1.

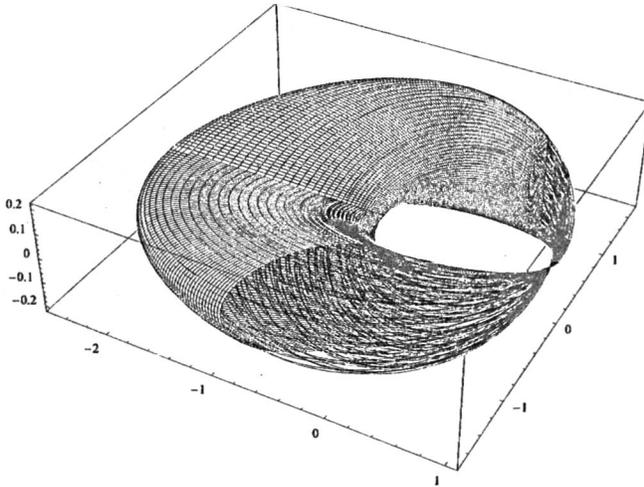


Рис. 1 Семейство невозмущенных орбит. Показана также часть искомой огibaющей поверхности S . На осях отложены расстояния в радиусах орбиты спутника.

Во **второй главе** рассматривается простейшая возмущенная задача: учитывается действие планеты. Считаем, что спутник движется по круговой орбите в плоскости экватора планеты. В приложениях это могут быть близкие естественные спутники (например, Фобос и Деймос), геостационарные спутники и т.д. Периодическими возмущениями пренебрегаем ввиду их малости. Вековые возмущения учитываем с точностью до первой степени сжатия. В этом случае вековым образом изменяются только средние аномалии и долготы узлов и перигенциев относительно плоскости экватора планеты.

Доказывается несоизмеримость средних движений трех указанных угловых переменных для почти всех частиц. Это свидетельствует о всюду плотном заполнении частицами внутренней области границы пылевого комплекса, что придает последней реальный физический смысл.

Излагается метод поиска границы семейства траекторий частиц. Проводятся необходимые подготовительные мероприятия для использования этого метода. Это позволяет, принимая во внимание найденные в первой главе элементы орбит выброшенных частиц, провести исследования и получить точную грани-

цу области возмущенных движений этих частиц, что и было сделано. В качестве опытного образца для тестирования метода рассматривается плоский вариант задачи, а затем решается пространственная задача. Область возмущенного движения частиц вместе с их орбитами приведена на рис. 2. Исследуются топологические и дифференциально-геометрические свойства найденной границы области, свойство вложенности друг в друга пылевых комплексов, образованных при выбросах различной интенсивности, случай выбросов малой интенсивности. Доказывается, что граница пылевого комплекса в данном случае не является всюду гладкой, а имеет угловые точки, что не было очевидно при постановке задачи. Определены также линейные размеры, площадь меридионального сечения и объем искомой области.

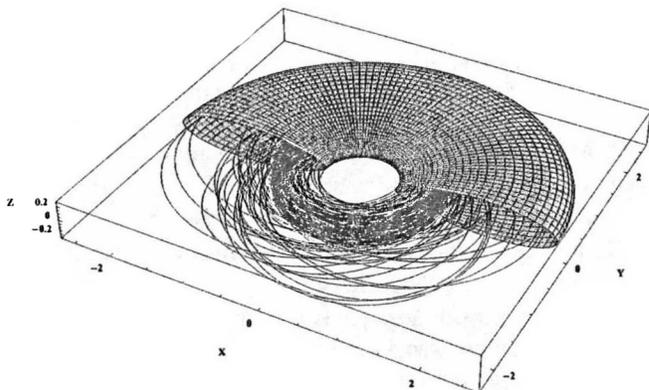


Рис. 2 Семейство возмущенных орбит в случае нулевого наклона i_0 орбиты родительского спутника к плоскости экватора планеты. Показана также часть искомой огибающей поверхности S . На осях отложены расстояния в радиусах орбиты спутника.

В **третьей главе** обосновывается подход к решению возмущенной задачи с учетом ненулевого наклона орбиты родительского спутника к плоскости экватора планеты. Проводятся необходимые мероприятия для использования методики поиска границы, что позволяет во многом свести поиск решения к предыдущему случаю нулевого наклона. Рассматривается пространственный случай. Исследуются дифференциально-

геометрические свойства найденной границы области. Результат можно увидеть на рис. 3.

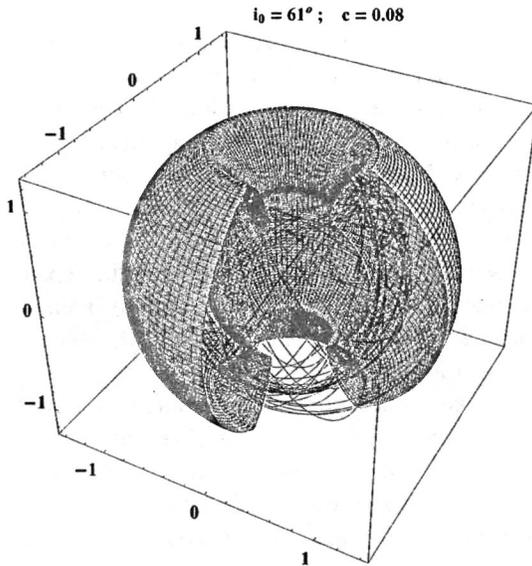


Рис. 3 Семейство возмущенных орбит в случае наклона $i_0 = 61^\circ$ орбиты родительского спутника к плоскости экватора планеты. Показана также часть искомой огибающей поверхности S . Масштаб по осям равен радиусу орбиты спутника.

В **четвертой** главе проводятся различные численные эксперименты для апробации полученных ранее аналитических результатов. Подтверждается достижимость границ пылевого комплекса его частицами во всех рассмотренных типах задач. Анализируется первоначальное разбегание частиц от точки выброса.

Численно получена концентрация частиц, составляющих пылевой комплекс, в возмущенном экваториальном случае, описанном в главе 2. Для этого был проведен следующий эксперимент: выбран произвольный интервал от некоторого момента $t_1 = 100$ оборотов, до $t_2 = 200$ оборотов спутника. Рассматривались 10762 частицы, выброшенных с одинаковой скоростью по направлениям, распределенным тремя способами (псевдослучайным, квазиравномерным и равномерным с заданной точ-

ностью) на сфере параметров. Для каждой частицы отмечались ее положения в сопутствующей плоскости для 67 моментов, равномерно распределенных между t_1 и t_2 . Для каждого момента по-порядку выбиралось одно значение g , из 67 равномерно распределенных на окружности $g \in [0, 2\pi)$. При таком подходе каждая частица всюду плотно заполняла область своей орбиты в *сопутствующей плоскости*. Сопутствующая плоскость по определению в каждый момент времени проходит через ось z и частицу. Полученное множество, состоящее из 721054 точек мы назвали *профиль концентрации*. Из него можно понять, где концентрация частиц выше, а где ниже при движении вдоль орбиты родительского спутника. Для сравнения на профиль концентрации мы наложили границу, найденную в главе 2 (а точнее, ее сечение плоскостью xz). Профиль концентрации представлен на рис. 4.

В этой же главе предложенная аналитическая теория применена к реальным физическим объектам Солнечной системы (рассмотрены произошедшие взрывы и столкновения ИСЗ, пылевые рои спутников Марса и Сатурна, поток Геминиды).

В **заключении** приводятся основные результаты работы.

Показано, что предложенный метод поиска границы области является универсальным не только для рассмотренных конкретных задач, но и для всего класса подобных задач.

Простота рассматриваемой модели компромиссна: с одной стороны, она допускает аналитическое решение, а с другой — результаты и выводы интересны и нетривиальны. Ими можно пользоваться для контроля в качестве первого приближения при численном исследовании схожих задач. Например, если исследуется орбитальный взрыв с различными возмущениями, в том числе и негравитационными, можно получить оценку вклада негравитационных эффектов в общую картину эволюции.

Автор предполагает, что в дальнейшем исследовании возможно снятие некоторых ограничений (появление неизотропности выброса, учет эксцентриситета орбиты родительского спутника и др.)

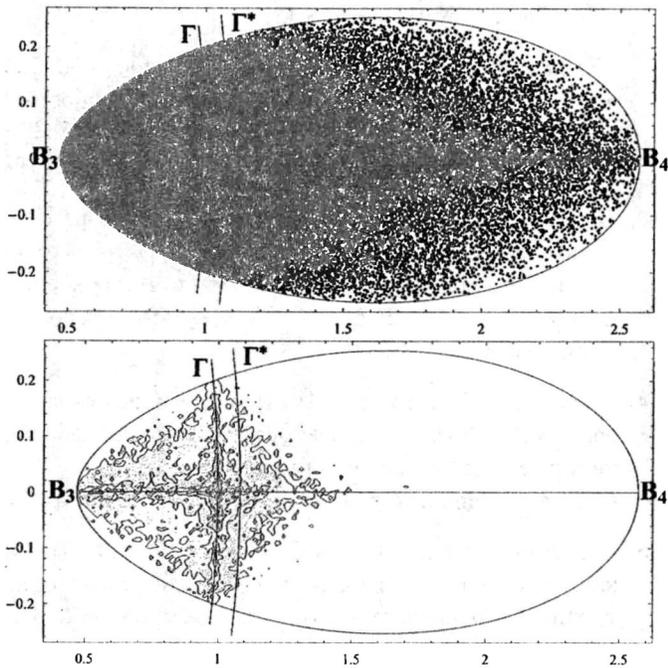


Рис. 4 Профиль концентрации частиц (непрерывный — верхний и дискретный — нижний рисунки) в совокупности с границей S , в возмущенной экваториальной задаче при **равномерном** размещении направлений выброса точек по сфере параметров. На осях отложены расстояния в радиусах орбиты спутника.

Список публикаций автора по теме диссертации

Основные результаты работы опубликованы в следующих рецензируемых изданиях, включенных в список ВАК:

1. *Холшевников К.В., Орлов С.А.* Пылевой тор. I. Уравнения огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц// Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. 2000. Вып. 3 (N 17). С. 118-123.
2. *Холшевников К.В., Орлов С.А., Джазмати М.С.* Пылевой тор. II. Исследование огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц// Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. 2003. Вып. 4 (N 25). С. 119-130.
3. *Орлов С.А., Холшевников К.В.* Пылевой тор. III. Уравнения огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц с учетом движения узлов и перицентров // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. 2004. Вып. 1 (N 1). С. 112-119.
4. *Орлов С.А.* Пылевой тор. IV. Исследование огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц с учетом движения узлов и перицентров // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. 2006. Вып. 3 (N 1). С. 131-144.
5. *Холшевников К.В., Орлов С.А.* Орбитальный пылевой тор как огибающая поверхность семейства траекторий изотропно выброшенных частиц// Астрон. вестн. 2008. Т. 42. N 2. С. 99-118.

Опубликованы резюме 11 докладов в Трудах вышеперечисленных конференций.

Личный вклад автора

Диссертация выполнена С. А. Орловым под руководством д.ф.-м.н., профессора К. В. Холшевникова. Необходимо выделить следующие моменты совместной и индивидуальной работы и степени участия в них. Постановка задачи была осуществлена К. В. Холшевниковым. Во всех публикациях автор работы

принимал участие в совместном с К. В. Холшевниковым построении алгоритма, его реализации и в обсуждении результатов. Автору принадлежит написание программного обеспечения для проверки аналитических выкладок, решения численных задач и подготовки иллюстраций.

Литература

- [1] *Артемяева Н.А., Шувалов В.В.* Численное моделирование высокоскоростных ударов при падении на Луну комет и астероидов // Астрон. вестн. 2008. Т. 42. N 4. С. 351-356.
- [2] *Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В.* Метеороидные рои: образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. N 4. С. 387-407.
- [3] *Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В.* Динамика и размеры короткопериодических метеороидных роев // Астрон. журнал. 1991. Т. 68. N 5. С. 1074-1085.
- [4] *Васильченко О.И., Бордовицына Т.В.* Численное моделирование распада и эволюции фрагментов космического аппарата на геостационарной орбите // Фунд. и прикл. пробл. совр. мех. Труды конференции. 2000. С. 125-126
- [5] *Горелов С.Л., Зарубкин А.С.* Начальная стадия образования облака „космического мусора“ при распаде спутника планеты // Косм. исслед. 2005. Т. 43. N 4. С. 269-273.
- [6] *Кулешова Л.А., Кирпичников С.Н.* Минимальные по длительности импульсные перелеты между круговыми некомпланарными орбитами // Вестн. С.-Петербур. ун-та. Сер. 1. 1999. N 22. С. 94-101.
- [7] *Коблик В.В., Холшевников К.В.* Огибающая орбит изотропно выброшенных частиц // Вестн. С.-Петербур. ун-та. Сер. 1. 1994. N 1. С. 98-102.
- [8] *Кривов А.В., Соколов Л.Л., Холшевников К.В., Шор В.А.* О существовании роя частиц в окрестности орбиты Фобоса // Астрон. вестн. 1991. Т. 25, N 3. С. 317-326.

- [9] *Медведев Ю.Д., Чернетенко Ю.А.* Роль малых тел Солнечной системы в задачах координатно-временного и навигационного обеспечения // *Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2009)*. Труды конференции. Санкт-Петербург. ИПА РАН. 2009. С. 187-188.
- [10] *Мишкин А.В.* Моделирование эволюции фрагментов распада геостационарного спутника на больших интервалах времени // *Физика Космоса. Труды конференции*. Екатеринбург. 2002. С. 140.
- [11] *Рябова Г.О.* Влияние вековых возмущений и эффекта Пойнтинга-Робертсона на структуру метеорного потока Геминид // *Астрон. вестн.* 1989. Т. 23. N 3. С. 254-264.
- [12] *Рябова Г.О.* Моделирование выброса крупных пылевых частиц из ядра кометы Галлея // *Астрон. вестн.* 1997. Т. 31. N 4. С. 314-326.
- [13] *Субботин М.Ф.* Введение в теоретическую астрономию // М. Наука. 1968. 800 с.
- [14] *Шайдулин В.Ш.* Динамическая эволюция облака частиц образовавшегося в результате взрыва объекта на геостационарной орбите // *Физика Космоса. Труды конференции*. Екатеринбург. 2005. С. 241.
- [15] *Krivov A. V., Sokolov L.L., Dikarev V.V.* Dynamics of Mars-orbiting Dust: Effects of Light Pressure and Planetary Oblateness // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 1996. N 63, P. 313-339.
- [16] *Krivov A. V.* On the dust belts of Mars // *Astron. Astrophys.* 1994. N 291. P. 657-663.
- [17] *Ryabova G.O.* Mathematical modelling of the Geminid meteoroid stream // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. V. 375. P. 1371-1380
- [18] *Soter S.* The Dust Belts of Mars // *Rept. of Center for Radiophysics and Space Res.* 1971. N 462.

