0-775519

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**БАНЬЩИКОВА Мария Александровна**

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА

Специальность 01.03.01 — Астрометрия и небесная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2009

Работа выполнена в ОСП НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук Авдюшев Виктор Анатольевич.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук Соколов Леонид Леонидович. Санкт-Петербургский государственный университет
кандидат физико-математических наук Мельников Александр Викторович. Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН



Ведущая организация:
Институт астрономии РАН

Защита состоится «14» апреля 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, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан «2» 03 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Орлов В.В.

# Общая характеристика работы

## Актуальность проблемы

Интенсивное и широкое использование новых астрометрических средств наблюдения за последние десятилетия вызвало небывалое повышение точности и стремительное увеличение количества наблюдательной информации о движении как уже известных, так и постоянно открываемых спутников планет. Это обстоятельство к настоящему моменту естественным образом ставит перед специалистами в области теоретической астрономии актуальную проблему о пересмотре существующих и разработке новых математических моделей, интерпретирующих наблюдательный материал.

## Цели работы

Целью настоящей работы является построение высокоточных численных моделей движения внутренних (близких) и внешних (далеких) спутников Юпитера, в том числе и новых, на основе всех имеющихся астрометрических наблюдений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Построена высокоточная численная модель движения спутников Юпитера.

2. Разработан и исследован способ для повышения быстродействия численного интегрирования уравнений движения за счет использования упрощенной модели влияния галилеевых спутников.

3. Исследована проблема множества решений в обратных задачах орбитальной динамики близких спутников.

4. Получены оценки орбитальных параметров близких и далеких спутников Юпитера по всем имеющимся астрометрическим наблюдениям.

5. При использовании линейных и нелинейных методов типа Монте-Карло построены начальные области возможных движений для всех далеких спутников Юпитера, а также численно исследована временная эволюция вероятностных областей.

## Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Построена новая высокоточная численная модель движения внутренних и внешних спутников Юпитера, причем численное моделирование орбит внутренних спутников выполнено впервые.

2. Исследованы и решены проблемы численного моделирования возмущений от галилеевых спутников, связанные с чрезвычайной сложностью формального представления их движения и вызываемыми ими короткопериодическими возмущениями в орбитах далеких спутников.

3. Сформулирована и исследована проблема множества решений в обратных задачах орбитальной динамики близких спутников.

4. Впервые построены области возможных движений для всех далеких спутников Юпитера с использованием линейных и нелинейных методов типа Монте-Карло, а также численно исследована эволюция этих областей.

5. Предложен быстрый приближенный способ оценивания размера области возможных движений на любой момент времени на основе формул задачи двух тел, а также получены оценки времени достоверности построенных моделей для планирования наблюдений спутников на основе начальных вероятностных областей.

Совместно с В.А. Авдюшевым (научным руководителем) были получены следующие результаты: построены численные орбитальные модели внутренних и внешних спутников Юпитера (Авдюшев, Баньщикова, 2007a; Авдюшев, Баньщикова, 2008); изучена проблема неоднозначного определения орбит близких спутников (Авдюшев, Баньщикова, 2007b; Баньщикова, Авдюшев, 2008), причем эта особенность в обратных задачах первоначально была обнаружена экспериментально автором данной работы, а затем объяснена Авдюшевым; применен и исследован составной подход, предложенный Авдюшевым, для уточнения орбитальных параметров близких спутников Юпитера (Авдюшев, Баньщикова, 2008).

Самостоятельно автором работы была исследована проблема численного моделирования возмущений от галилеевых спутников (Баньщикова, 2008a), в результате чего в задачах динамики далеких спутников для разрешения этой проблемы была использована формализация гауссовых колец, как упрощенное представление гравитационного влияния массивных спутников; из имеющихся спутниковых наблюдений получены новые оценки орбитальных параметров далеких спутников Юпитера; предложен быстрый приближенный способ оценивания размера области возможных движений на любой момент времени, а также вычислены оценки времени достоверности построенных моделей, полезные для планирования наблюдений спутников (Баньщикова, Авдюшев, 2006a); на основе моделирования областей возможных движений получены оценки неопределенностей в орбитальных параметрах для всех внешних спутников Юпитера (Авдюшев, Баньщикова, 2007a; Ban'shchikova, 2008).

## Практическая значимость работы

Представленные в работе методы, а также разработанное на их основе программно-математическое обеспечение может быть использовано для высокоэффективного численного моделирования спутниковых орбит, например, с целью идентификации и планирования наблюдений небесных тел. Кроме того, применяемые здесь методики вполне приемлемы и для численного исследования иных задач, не рассматриваемых в работе, которые в плане моделирования имеют тесное родство с задачами околопланетной динамики. В частности, методы нелинейного оценивания параметрической точности могут быть весьма полезными в задачах астероидной опасности для оценки вероятности столкновения объектов с Землей, особенно в тех случаях, когда астероидная орбита определяется по немногочисленным наблюдениям на очень короткой дуге и потому имеет большие параметрические ошибки.

## Апробация работы

По результатам исследования опубликовано 16 работ (Баньщикова, Авдюшев, 2004a; Баньщикова, 2004; Баньщикова, Авдюшев, 2004b; Баньщикова, 2005; Баньщикова, Авдюшев, 2006a; Баньщикова, Авдюшев, 2006b; Баньщикова, 2006; Авдюшев, Баньщикова, 2007a; Баньщикова, Авдюшев, 2007; Авдюшев, Баньщикова, 2007b; Черницов и др., 2007; Авдюшев, Баньщикова, 2008; Баньщикова, 2008a; Баньщикова, 2008b; Ban'shchikova, 2008; Баньщикова, Авдюшев, 2008): 6 тезисов и 10 статей, причем 5 из них в изданиях, рекомендуемых ВАК для публикации научных работ. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 10 конференциях:

1. XXXIII Международная студенческая научная конференция, г. Екатеринбург, 2–6 февраля 2004 г.;

2. Всероссийская астрономическая конференция ВАК–2004, г. Москва, 3–10 июня 2004 г.;

3. Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 5–7 октября 2004 г.;

4. VIII съезд Астрономического общества, «Астрономия–2005» Состояние и перспективы развития, г. Москва, май 2005 г.

5. XXXV Международная студенческая научная конференция, г. Екатеринбург, 30 января – 3 февраля 2006 г.;

6. Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 3–5 октября 2006 г.;

7. Всероссийская астрономическая конференция ВАК–2007, г. Казань, 18–21 сентября, 2007 г.;

8. XXXVII Международная студенческая научная конференция, г. Екатеринбург, 28 января – 1 февраля, 2008 г.;

9. Международная астрономическая конференция «Динамика тел Солнечной системы», г. Томск, 27 июля – 1 августа 2008 г.

10. VI Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 25 сентября – 2 октября 2008 г.

Все результаты, представленные в диссертации, включены в отчет по госбюджетной теме «Математическое моделирование движения, распределения и орбитальной эволюции малых тел солнечной системы по результатам измерений» N госрегистрации 01.200.1 12390. Кроме того, отдельные результаты включены в отчеты по грантам, поддержанным РФФИ (05-02-17043-а, 08-02-00359-а).

## Результаты, выносимые на защиту.

1. Высокоточная численная модель орбитального движения близких и далеких спутников Юпитера.

2. Результаты анализа эффективности различных способов для разрешения проблемы, возникающей при учете короткопериодических возмущений в численном интегрировании уравнений движения далеких спутников Юпитера под действием влияния от галилеевых спутников.

3. Результаты исследования проблемы неоднозначного определения орбит близких спутников.

4. Новые оценки орбитальных параметров далеких и внутренних спутников Юпитера по всем имеющимся наблюдательным данным до 2008 г.

5. Результаты исследования областей возможных движений внутренних и внешних спутников Юпитера.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (98 наименований) и шести приложений, содержит 48 рисунков и 27 таблиц. Общий объем работы составляет 125 страниц.

## Краткое содержание диссертационной работы

Во введении обосновывается актуальность проблемы, формулируется цель исследования, представляются результаты выносимые на защиту, излагаются доводы, определяющие новизну и практическую значимость работы, описывается структура диссертации.

В первой главе диссертационной работы описана структура спутниковой системы Юпитера. Дается обзор разработанных ранее другими авторами орбитальных моделей спутников Юпитера. Детально описывается орбитальная модель для внутренних и внешних спутников Юпитера, разработанная соискателем.

Построенная численная модель основана на дифференциальных уравнениях движения спутников в прямоугольных координатах с учетом возмущающих факторов от несферичности центральной планеты, галилеевых спутников, Солнца, планет-гигантов и релятивистских эффектов в рамках задачи Шварцшильда. Для численного интегрирования дифференциальных уравнений движения спутников Юпитера использовался интегратор Гаусса–Эверхарта. Формулируются проблемы учета влияния галилеевых спутников при численном моделировании орбит внутренних и внешних спутников. Первая проблема связана с чрезвычайной сложностью моделей движения галилеевых спутников. Сложность модели предполагает многочисленные вычисления, что ведет к существенному понижению быстродействия численного процесса. Вторая трудность имеет место при моделировании орбит далеких спутников. Своим влиянием галилеевы спутники вносят короткопериодические возмущения в орбиту далекого спутника, что, в свою очередь, приводит при численном интегрировании орбиты к дроблению шага интегрирования, и соответственно к понижению быстродействия процесса моделирования, несмотря на малость самих возмущений от галилеевых спутников. Причем учет влияния от массивных спутников может понижать быстродействие в несколько десятков раз. С целью разрешения этих проблем рассмотрены и исследованы шесть упрощенных моделей влияния галилеевых спутников, пять из которых отличались друг от друга способами вычисления влияния от галилеевых спутников: высокоточная с использованием аналитической теории Леней (I); с круговой моделью орбит галилеевых спутников (II); с использованием гауссовых колец (III); многоточечная модель (IV); с модифицированным гравитационным параметром (V). В шестой модели (VI) влияния галилеевых спутников не учитывалось. Как показали результаты, с точки зрения соотношения точность-быстродействие модель III (с использованием гауссовых колец) оказывается самой эффективной для численного моделирования орбит внешних спутников, так как представляет движение внешнего спутника точнее, чем другие упрощенные модели V и VI (без короткопериодических возмущений от галилеевых спутников). Поэтому в орбитальных моделях внешних спутников для учета влияния галилеевых спутников использовались гауссовы кольца (III), а в моделях движения внутренних спутников положения галилеевых спутников вычислялись по высокоточной теории Леней (I).

Во второй главе излагается методика оценивания орбитальных параметров спутников Юпитера из наблюдений. Формулируется и исследуется проблема неоднозначного определения орбит внутренних спутников. Для эффективного решения обратной задачи предлагается составной подход, включающий в себя известные методы Гаусса–Ньютона и градиентного спуска совместно с так называемым проекционным методом. Рассматриваются и исследуются способы моделирования областей возможных движений для оценки параметрической точности в линейном и нелинейном случаях. Предлагается способ приближенного прогнозирования эволюции областей возможных движений.

Как известно, параметры орбитальной модели $\mathbf{q}$ определяются из наблюдений в рамках задачи наименьших квадратов, которая, как правило, сводится к минимизации некоторой целевой функции $S$, выражающей степень близости наблюдаемых и моделируемых положений объекта. В свою очередь, минимизация целевой функции выполняется итерационными методами типа Гаусса–Ньютона (1):

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k - \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{G}, \tag{1}$$

где $\mathbf{q}$ — определяемые параметры, $\mathbf{Q} = \mathbf{A}^T\mathbf{A}$ — нормальная матрица, $\mathbf{G} = -\mathbf{A}^T\mathbf{B}$ — градиент целевой функции $S$ по $\mathbf{q}$, $\mathbf{A}$ — матрица условных уравнений, $\mathbf{B}$ — вектор невязок модели.

Проблема неоднозначного определения орбит близких спутников, связанна с многочисленными минимумами принятой целевой функции обратной задачи, что фактически имеет место, когда орбита спутника определяется по ряду разрозненных наблюдений, распределенных на достаточно длительном интервале времени. На примере круговой двухпараметрической задачи исследована проблема множества решений и показано, что поведение целевой функции обратной задачи в окрестности точных параметрических значений хорошо описывается функцией:

$$F(\zeta, \beta) = 1 - \sum_{j=1}^{M} k_j \cos((l_j - l_0)\zeta - \beta), \tag{2}$$

где

$$\zeta = \frac{3}{2}\alpha n(t_M - t_1), \quad l_j = \frac{t_j - t_1}{t_M - t_1} \quad (j = 0, \ldots, M),$$

$\alpha$ — относительная вариация большой полуоси; $\beta$ — вариация аномалии в эпоху; $M$ — число групп наблюдений; $k_j = N_j/N$ — вес $j$-группы, определяемый числом наблюдений в группе $N_j$ при общем количестве $N$; а $t_j$ — дата группы наблюдений, выбираемая как одно из значений $t$ $j$-группы (при этом предполагается, что $t_1 \ll t_2 \ll \ldots \ll t_M$). Таким образом, величины $l_0$ и $l_j \in [0, 1]$ $(j = 1, \ldots, M)$ представляют собой нормированное временное распределение соответственно начальной эпохи и групп наблюдений относительно первой группы. Как видно, функция $F$ $2\pi$-периодична по $\beta$ и при фиксированном $\alpha$ имеет единственный минимум на полуинтервале $[\beta_0 - \pi, \beta_0 + \pi)$ для любых $\beta_0 \in (-\infty, +\infty)$, поэтому область исследования $F$ по $\beta$ можно ограничить до любого полуинтервала длиной в $2\pi$. Наличие тригонометрических составляющих в (2) выявляет сложное поведение целевой функции, имеющей множество минимумов.

Для удобства исследования целевой функции на предмет множества решений в работе также введена безразмерная характеристика Ф, минимумы которой однозначно соответствуют минимумам $F$ на любой полосе $\alpha \in (-\infty, +\infty)$ и $\beta \in [\beta_0 - \pi, \beta_0 + \pi)$. Функция Ф имеет вид:

$$\Phi(\zeta) = \min_{\beta \in [\beta_0 - \pi, \beta_0 + \pi)} F(\zeta, \beta) = 1 - \sqrt{c^2 + s^2}, \tag{3}$$

$$c = \sum_{j=1}^{N} k_j \cos(l_j \zeta), \quad s = \sum_{j=1}^{N} k_j \sin(l_j \zeta).$$

Для двух групп наблюдений одинакового веса (спутник Адрастея) функция $\Phi(\zeta)$ имеет множество равнозначных минимума (рисунок 1), что говорит о существованиии проблемы выбора правильного решения, наилучшим образом представляющее действительную спутниковую орбиту.

В данной главе также исследуется эффективность метода Гаусса–Ньютона для численного решения обратных задач орбитальной динамики близких спутников. Результаты показали, что при различных рассматриваемых

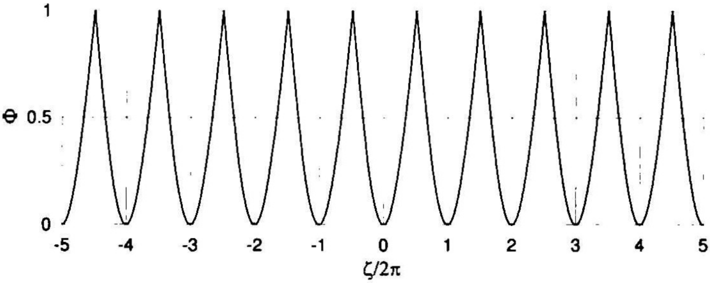


Рис. 1: Поведение $\Phi(\zeta)$ для двух групп наблюдений одинакового веса (спутник Адрастея)

начальных приближениях итерационный процесс сходится только в 0.4% случаях, причем за большое количество итераций (порядка 5000 итераций). Для достижения более быстрой сходимости итерационного процесса в работе предлагается составной подход, где совместно с методом Гаусса Ньютона используются метод градиентного спуска и так называемый проекционный способ.

Использование составного подхода показало высокую эффективность при определении орбит близких спутников. При его применении скорость сходимости итерационного процесса возрастает в сотни раз в сравнении с использованием только одной итерационной схемы Гаусса–Ньютона (1).

Для оценки точности орбитальных параметров внутренних и внешних спутников использовались так называемые области возможных движений (Milani, 1999; Bordovitsyna et al., 2001; Williams et al., 2005; Muinonen et al., 2006; Авдюшев, Баньщикова, 2007a), моделирование которых в данной работе рассматривалось в рамках линейной и нелинейной задач наименьших квадратов (НК).

В линейном случае построение области возможных движений основывалось на использовании матрицы Холецкого $\mathbf{C}^{1/2}$ по формуле

$$\mathbf{q} = \hat{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^{1/2}\boldsymbol{\eta}, \tag{4}$$

где $\hat{\mathbf{q}}$ — НК-оценки орбитальных параметров, $\boldsymbol{\eta}$ — $K$-мерный случайный вектор, несмещенный и нормально распределенный с единичной дисперсией, $K = 6$ — число оцениваемых параметров, в качестве которых выступают компоненты вектора начального динамического состояния.

Известно, что связь между представлениями наблюдений моделью и ее параметрами нелинейна. Поэтому использование оценок линейной задачи наименьших квадратов для моделирования областей возможных движений будет обосновано только в том случае, если эти области достаточно малы, где указанная связь достаточно хорошо представляется линейной аппроксимацией. Иначе оценки линейной НК-задачи будут недостоверно описывать вероятностные области.

Для того чтобы определить, можно ли использовать оценки линейной задачи наименьших квадратов для моделирования областей возможных движений в нелинейной задаче, вводится так называемый коэффициент нелинейности $\varkappa$, выражающий степень влияния нелинейности на распределение параметрических ошибок:

$$\varkappa = \frac{1}{2}\frac{\tilde{S} - \bar{S}}{\bar{S} - \hat{S}}, \qquad \bar{S} = \hat{S}\left(1 + \frac{\kappa_\alpha^2}{N - K}\right), \tag{5}$$

где $\tilde{S}$ — значения целевой функции на поверхности доверительного эллипсоида (Draper, Smith H., 1981) линеаризированной задачи, $\bar{S}$ — ожидаемые значения целевой функции в линейном случае, $\hat{S}$ — значение целевой функции в оценке. Данный коэффициент (5) позволяет в нелинейном случае приближенно оценить степень отклонения уровенной поверхности от эллипсоидальной.

Если $\varkappa$ достаточно большая величина ($> 0.1$), нелинейностью нельзя пренебрегать. В этом случае необходимо прибегать к нелинейному оцениванию, и для исследования неопределенностей в орбитальных параметрах можно использовать метод вариации наблюдений. Данный метод состоит в следующем. В представления наблюдений спутника $\hat{\mathbf{P}}^C$, полученные с помощью численной модели по параметрическим оценкам, многократно вносятся случайные величины $\delta\mathbf{P}$, распределенные по нормальному закону с заданной дисперсией $\sigma^2$, и для каждой выборки моделируемых наблюдений $\hat{\mathbf{P}}^C + \delta\mathbf{P}$ решается нелинейная задача наименьших квадратов. В итоге, получаем область возможных движений

$$\mathbf{q} : S(\mathbf{q}) = \|\hat{\mathbf{P}}^C + \delta\mathbf{P} - \mathbf{P}^C(\mathbf{q})\|^2 \to \min, \tag{6}$$

где $\mathbf{P}^C(\mathbf{q})$ — представление наблюдений по параметрам $\mathbf{q}$ согласно принятой динамической модели в обратной задаче.

В последнем разделе главы 2 описан способ прогнозирования эволюции области возможных движений. Для грубой оценки размеров больших областей возможных слабовозмущенных движений можно воспользоваться формулами круговой задачи двух тел. Нетрудно показать, что вариации начальных данных круговой орбиты приводят к вариациям в векторе положения

$$|\Delta \mathbf{x}| \approx 2a \sin\frac{|\Delta l|}{2}, \quad \Delta l = \Delta n(t - t_0), \tag{7}$$

где $\Delta n$ — вариация в среднем движении.

Вместе с тем на основе круговой задачи можно ввести некоторое характеристическое время $\Delta t_{tol}$:

$$\Delta t_{tol} = \frac{2}{|\Delta n|}\arcsin\frac{|\mathbf{x}_{top}|\gamma_{tol}}{2a}, \tag{8}$$

приближенно определяющее временной интервал, на котором построенная модель может быть пригодна для планирования наблюдения объекта с угловой ошибкой $\gamma_{tol}$. В качестве $|\Delta n|$ выбирается максимальное из всех отклонений возможных средних движений от номинального. $|\mathbf{x}_{top}|$ — топоцентрическое расстояние до объекта.

В третьей главе представлены численные результаты моделирования движения внутренних спутников Юпитера по имеющимся наблюдениям. Описывается динамика и используемые наблюдения близких спутников.

Начальные оценки орбитальных параметров $\mathbf{q}_0$ предварительно были получены нами из наблюдений методом Лапласа. Для уточнения орбитальных параметров использовался составной подход, описанный во второй главе. Отправляясь от начальных приближений $\mathbf{q}_0$, всего за несколько десятков итераций мы получили оценки орбитальных параметров $\mathbf{q} = (\mathbf{x}_0, \dot{\mathbf{x}}_0)$, минимизирующие целевую функцию с заданной точностью. Полученные оценки параметров дают среднеквадратические ошибки, не превышающие величину 0.4″, что говорит о хорошем согласии с внешней точностью наземных наблюдений.

Ввиду малого количества групп спутниковых наблюдений для Адрастеи и Метиды в работе исследована проблема неоднозначного определения орбитальных параметров данных объектов. Несмотря на малость среднеквадратических ошибок для этих спутников, существуют еще и другие минимумы целевой функции, в которых ошибки принимают близкие значе-

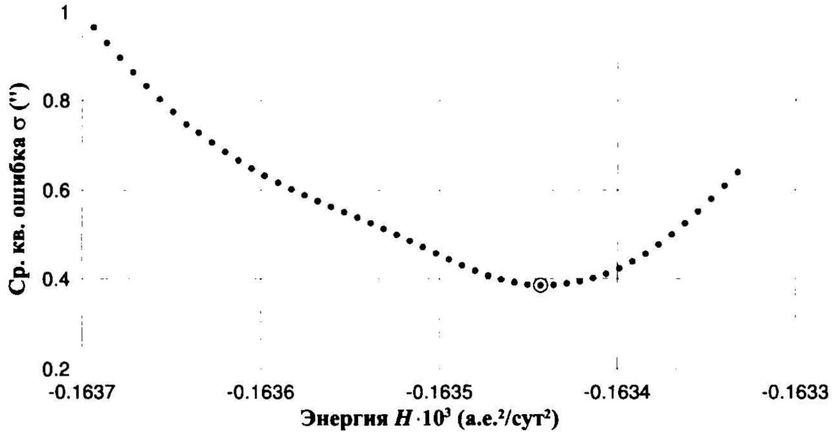


Рис. 2: Среднеквадратические ошибки для различных решений (Адрастея)

ния. Для Адрастеи были исследованы 50 таких минимумов, тогда как для Метиды — 2.

Примечательно, что для Адрастеи абсолютный минимум целевой функции достигается именно в первоначально найденном нами решении $\tilde{\mathbf{q}}$. Однако, в его окрестности имеются соседние, представляющие значения $\sigma$, которые отличаются от $\tilde{\sigma}$ на величины меньше $0.01''$ (рисунок 2). Поэтому у нас есть веское основание подозревать, что наилучшие (в смысле ближайшие к истинным параметрам) оценки вполне вероятно могут находиться в соседних минимумах. Что касается Метиды, то результаты исследования двух подозрительных решений окончательно развеяли сомнения по поводу их принадлежности к потенциально приемлемым для описания спутниковой орбиты. Результаты показали, что среднеквадратические ошибки смежных решений существенно больше ошибки изначально полученного решения.

Полученные эфемериды мы сравнили с эфемеридами НАСА (JUP230) (Jacobson, 1994). Результаты показали, что наши результаты для Амальтеи очень хорошо согласуются с эфемеридой НАСА, тогда как для других спутников — несколько хуже. Это объясняется тем, что у давно известного спутника очень много наблюдательных данных, охватывающих более длительный интервал времени, нежели у спутников, открытых только в 1979 г.

Полученное нами решение для Адрастеи показало очень плохое согласие с JUP230. Мы проверили соседние решения и оказалось, что эфемерида JUP230 хорошо согласуется с одним из соседних решений.

Также мы оценили точность полученных орбитальных параметров близких спутников Юпитера с использованием вероятностных областей. Результаты показали, что нелинейность используемых моделей для близких спутников настолько значительна, что ковариационные матрицы, строго говоря, оказываются совершенно бесполезными для вероятностного описания распределений параметрических ошибок и в данном случае следует прибегать к нелинейному оцениванию. Несмотря на то, что вероятностные области для близких спутников существенно меньше областей для далеких спутников, тем не менее они оказываются еще достаточно большими для их описания в контексте линейной НК-задачи. Недостатком использования нелинейного оценивания является многократное численное решение нелинейной НК-задачи, что делает практически невозможным его реализацию применительно к оцениванию точности орбитальных параметров близких спутников, поскольку выполнение каждой итерации метода Гаусса–Ньютона вследствие долгосрочного численного интегрирования даже на современных компьютерах занимает несколько часов. В связи с этими трудностями мы не строим области возможных параметров для близких спутников с использование их высокоточных динамических моделей.

Используя простую модель кеплеровского движения мы воспроизвели обратную задачу для близкого спутника Юпитера Адрастеи и по схемам (4) и (6) (линейного и нелинейного оценивания) построили области возможных параметров. Причем среднеквадратическая ошибка наблюдений была $0.2''$. На рисунке 3 показаны проекции этих областей, ориентированные относительно собственных векторов $\mathbf{w}$, соответствующей ковариационной матрицы (иначе говоря, относительно главных осей доверительного эллипсоида линеаризированной задачи). Здесь приводятся только проекции вдоль собственного вектора $\mathbf{w}_1$ с наименьшим собственным числом, и, как видно из рисунка, вероятностные области совершенно не согласуются друг с другом.

Четвертая глава посвящена моделированию движения внешних спутников Юпитера. Описывается динамика и используемые наблюдения внешних спутников. Определяются и уточняются орбиты 54 спутников Юпи-

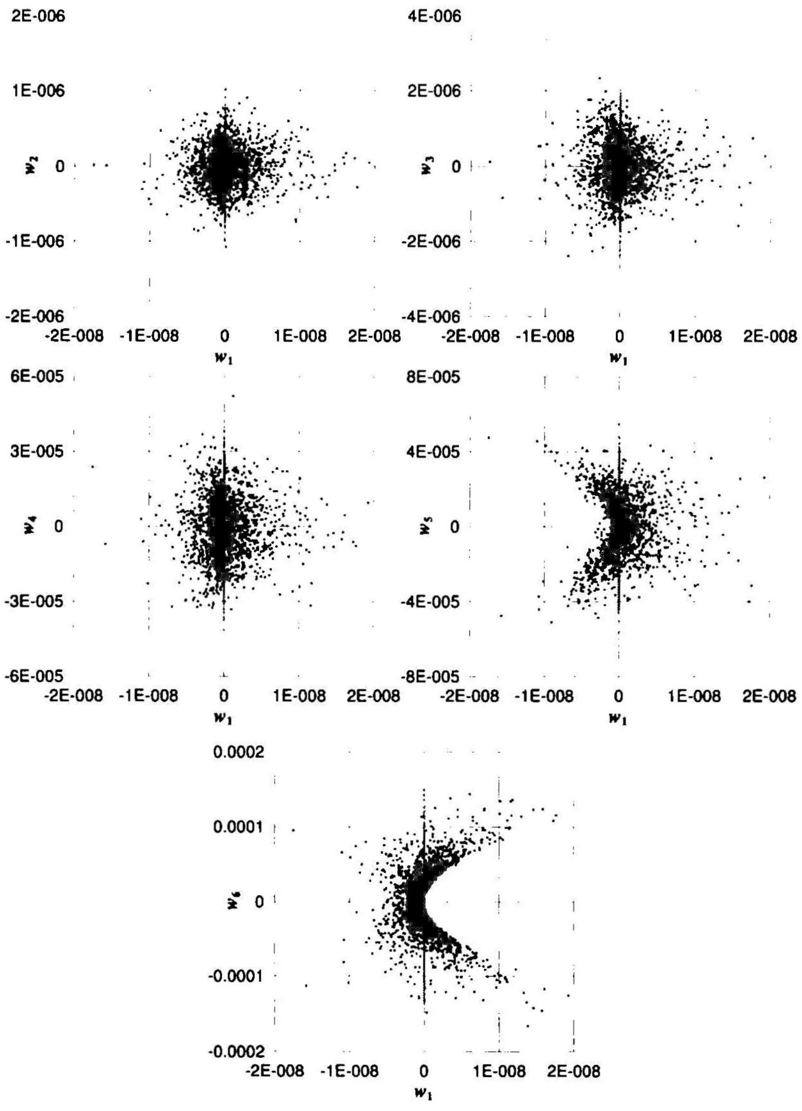


Рис. 3: Проекции вероятностных областей для Адрастеи относительно НК-оценок на плоскости, определяемые собственными векторами $\mathbf{w}_i$ соответствующей ковариационной матрицы: линейные оценки представлены серым цветом, нелинейные — черным.

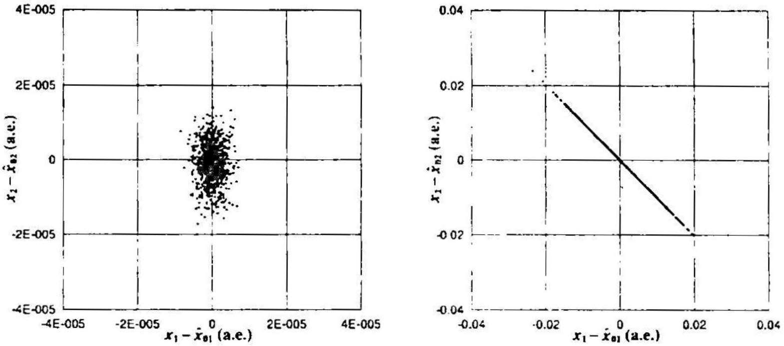


Рис. 4: Вероятностные области, полученные по ковариационным матрицам на основе реальных спутниковых наблюдений, для Фемисто и S/2003 J04

тера, в том числе 46 новых спутников, открытых в период с 1999 г. по 2003 г., а также строятся области возможных движений. Как показывают результаты, несмотря на малость среднеквадратической ошибки для далеких спутников, соответствующие им области возможных начальных параметров оказываются весьма разнообразными не только по размеру, но и по форме (рисунок 4).

Большие начальные вероятностные области вообще говорят о том, что наблюдений для соответствующих спутников пока не достаточно для уверенного прогноза спутникового движения, например, с целью планирования наблюдений в будущем.

При планировании наземных наблюдений требуемая точность прогноза движения непосредственно определяется размерами сканируемого наблюдательным средством участка неба, где ожидается появление объекта. Например, если мы намечаем провести наблюдение спутника S/2003 J10 через оборот, ожидая его появление на достаточно большом участке $1^\circ \times 1^\circ$, использование динамической модели спутника для выработки целеуказания наблюдателю в данном случае оказывается неприемлемым, поскольку вероятностная область для S/2003 J10 настолько обширна, что значительная часть ее выпадает за пределы обозреваемого поля, центр которого настроен на прогнозируемое положение объекта и, следовательно, есть вероятность потерять спутник.

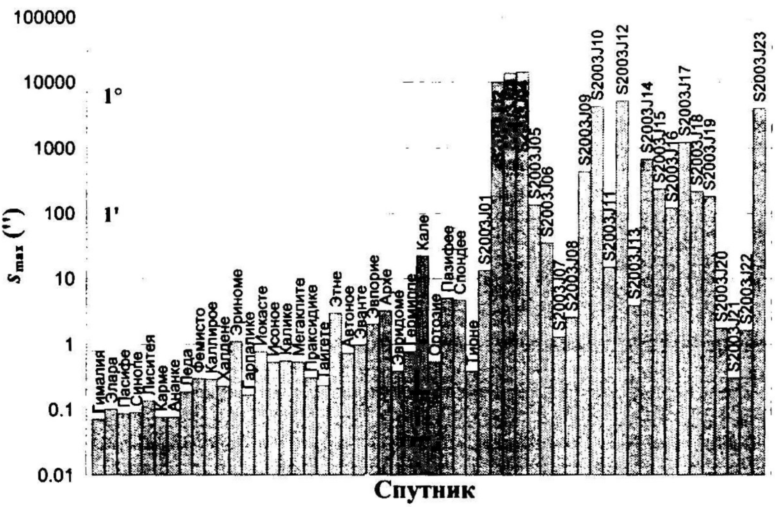


Рис. 5: Максимальные угловые отклонения возможных спутниковых положений от соответствующих номинальных на геоцентрической небесной сфере через один оборот

В качестве характеристики размера вероятностной области в проекции на небесную сферу мы взяли максимальное угловое отклонение возможных положений $(\alpha^i, \delta^i)$ от номинального $(\hat{\alpha}, \hat{\delta})$, полученного из НК-оценок:

$$s_{\max} = \max_{i=1,\dots,N} \sqrt{(\alpha^i - \hat{\alpha})^2 \cos^2 \hat{\delta} + (\delta^i - \hat{\delta})^2}. \tag{9}$$

Мы оценили величины $s_{\max}$ для каждого спутника через один оборот при $N = 1000$. Результаты приведены на рисунке 5, где спутники следуют в порядке их открытия.

Как видно по значениям $s_{\max}$, помимо S/2003 J10 имеется еще ряд объектов (а именно: S/2003 J02, S/2003 J03, S/2003 J04, S/2003 J12 и S/2003 J23), которые могут быть потеряны при попытке обнаружить их через оборот на участке неба с угловыми размерами порядка 1°. Естественно, при уменьшении угла обзора потенциально исчезающих объектов становится больше.

Для далеких спутников Юпитера мы вычислили значения коэффициента $\varkappa$ (5). Как показали результаты, почти все именованные спутники (кроме Кале) имеют достаточно малые коэффициенты нелинейности, которые составляют величины порядка 0.001 и меньше. Размеры вероятностных областей для именованных спутников сравнительно небольшие и поэтому вариации областей за счет такой нелинейности можно считать незначительными, следовательно, мы можем использовать линейные оценки. В то же время значения показателя нелинейности $\varkappa$ для некоторых неименованных спутников (открытых в 2003 г.) достаточно большие и поэтому для определения точности орбитальных параметров этих спутников мы не могли использовать линейные оценки и прибегали к нелинейному оцениванию. С этой целью были пересмотрены точностные характеристики для спутников J02, J03, J04, J09, J10, J12 и J14 группы S/2003, у которых $\varkappa > 0.01$.

Кроме того, в данном разделе представлены результаты исследования орбитальной эволюции новых спутников на длительных интервалах времени. Было обнаружено, что некоторые возможные орбиты спутника S/2003 J02 выходят за пределы гравитационной сферы Юпитера, иначе говоря, имеется вероятность, что объект станет астероидом (рисунок 6). По предварительным линейным оценкам вероятность того, что уже за 100 лет спутник сменит свое амплуа, составляет приблизительно 0.06. Однако уже по нелинейным оценкам эта вероятность оказывается на порядок меньше и составляет 0.005.

В последнем разделе для всей совокупности далеких спутников даются временные интервалы достоверности $\Delta t_{tol}$ (8), на которых построенные орбитальные модели могут быть пригодны для численного представления спутникового движения в угловых геоцентрических координатах с заданной точностью. Как показали результаты, для спутников с богатой хронологией наблюдательных данных интервалы достоверности, соответствующие угловой точности $\gamma_{tol} = 1''$, достаточно большие, от 10 лет (Фемисто) до 60 лет (Гималия). Интервалы достоверности для других (новых) спутников гораздо меньше и не превосходят одного орбитального периода, кроме Каллирое. Результаты для некоторых неименованных спутников не приводятся вовсе, поскольку размеры уже их начальных вероятностных областей в проекции на небесную сферу оказываются больше $\gamma_{tol} = 1''$.

<u>В Заключении</u> перечислены основные результаты диссертационной работы.

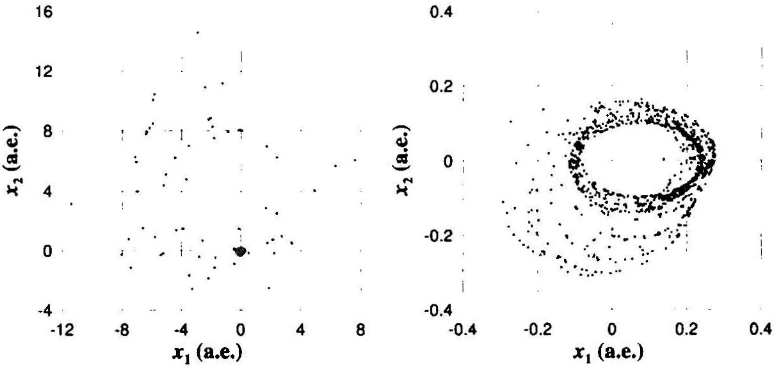


Рис. 6: Вероятностная область спутника S/2003 J02 через 100 лет. Рисунок справа — увеличенный фрагмент рисунка слева

## Список опубликованных работ по теме диссертации

Авдюшев В.А., Баньщикова М.А. Области возможных движений новых спутников Юпитера // Астрон. вест. 2007a. Т. 41. N 5. С. 446–452.

Авдюшев В.А., Баньщикова М.А. Особенности в решении обратных задач динамики близких спутников // Тр. всероссийской астрономической конференции ВАК 2007. Изд-во КГУ. 2007b. С. 3–4.

Авдюшев В.А., Баньщикова М.А. Определение орбит близких спутников Юпитера // Астрон. вестн., 2008. Т. 42. N 5. С. 156–195.

Баньщикова М.А. Численная теория движения близких спутников Юпитера // Физика космоса: Тр. 33 междунар. студ. научн. конф., Екатеринбург, 2–6 февраля 2004 г. Екатеринбург: Изд-во УрГУ. 2004. С. 261.

Баньщикова М.А. Высокоточное численное моделирование движения спутников Юпитера // Тез. докл. VIII съезда Астрономического общества «Астрономия — 2005». Состояние и перспективы развития. М.: Изд-во ГАИШ МГУ, 2005. С. 17.

Баньщикова М.А. Моделирование областей возможных движений спутников Юпитера // Физика космоса: Тр. 35 междунар. студ. научн. конф., 30 января – 3 февраля 2006 г. Екатеринбург: Изд-во УрГУ. 2006. С. 241.

Баньщикова М.А. Моделирование влияния галилеевых спутников в задачах динамики близких и далеких спутников Юпитера // Изв. вузов. Физика. 2008a. N 1. С. 60–65.

Баньщикова М.А. Исследование областей возможных движений для далеких спутников Юпитера // Физика космоса: Тр. 37 международ. студ. научн. конф., 28 января – 1 февраля 2008. Екатеринбург: Изд-во УрГУ. 2008b. С. 252.

Баньщикова М.А., Авдюшев В.А. Численное моделирование движения Амальтеи и Тебы, близких спутников Юпитера // IV Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 5–7 октября 2004 г. Томск: Изд-во ТГУ, 2004a. С. 333.

Баньщикова М.А., Авдюшев В.А. Численное моделирование движения близких спутников Юпитера // Тез. докладов на всероссийской астрономической конференции «Горизонты вселенной» ВАК–2004. М.: ГАИШ МГУ. 2004b. С. 203.

Баньщикова М.А., Авдюшев В.А. Численное моделирование динамики спутников Юпитера // Изв. вузов. Физика. 2006a. № 2. Приложение. С. 74–82.

Баньщикова М.А., Авдюшев В.А. Исследование областей возможных движений новых далеких спутников Юпитера // Матер. V Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2006b. С. 413–414.

Баньщикова М.А., Авдюшев В.А. Исследование областей возможных движений далеких спутников Юпитера // Тр. всероссийской астрономической конференции ВАК–2007. Изд-во КГУ. 2007. С. 46–47.

Баньщикова М.А., Авдюшев В.А. Исследование проблемы множества решений в обратных задачах близких спутников планет // Матер. VI Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: Изд-во ТГУ. 2008. С. 411.

Черницов А.М., Тамаров В.А., Авдюшев В.А., Баньщикова М.А., Дубас О.М. Особенности определения доверительных областей в пространстве начальных параметров движения малых тел солнечной системы // Изв. вузов. Физика. 2007. Приложение. Вып. 3. С. 33–43.

Ban'shchikova M.A. Investigation of Region of Possible Motions for Jovian Outer Satellites // Proc. Internat. Astron. Conf. Tomsk. Jule 27 – August 1, 2008. Tomsk: Tomsk State University. 2008. P. 19.

## Список цитируемой литературы


Bordovitsyna T., Avdyushev V., Chernitsov A. New Trends in Numerical Simulation of the Motion of Small Bodies of the Solar System // Celest. Mech. 2001. V. 80. I. 3. P. 227–247.

Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. John Wiley and Sons Ltd. 1981. 709 p.

Jacobson R.A. Revised Ephemerides of the Inner Jovian Satellites // JPL IOM. V. 314. 1994. P. 10–101.

Milani A. The Identification Problem I: Recovery of Lost Asteroids // Icarus. 1999. V. 137. P. 269–292.

Muinonen K., Virtanen J., Granvik M., Laakso T. Asteroid Orbits Using Phase-Space Volumes of Variation // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2006. V. 368. P. 809–818.

Williams I.P., Ryabova G.O., Baturin A.P., Chernitsov A.M. Are asteroid 2003 EH1 and comet C/1490 Y1 dynamically related? // Earth, Moon, and Planets. 2005. V. 95. P. 11–18.

Подписано к печати 26.02.09. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать цифровая. Печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ 4398.

Отпечатано в Отделе оперативной полиграфии химического факультета СПбГУ
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26
Тел.: (812) 428-4043, 428-6919

10=