Институт Прикладной Астрономии
Российской Академии Наук

На правах рукописи

МЕДВЕДЕВ
Юрий Дмитриевич

ЭФФЕКТЫ СУБЛИМАЦИИ В ОРБИТАЛЬНОМ И ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ КОМЕТНОГО ЯДРА

(01.03.01 — астрометрия и небесная механика)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

Санкт-Петербург
1995

Работа выполнена в Институте Теоретической Астрономии Российской Академии Наук (г. Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук профессор Ю.Н. Гнедин

доктор физико–математических наук профессор Е.А. Гребеников

доктор физико–математических наук профессор А.П. Маркеев

Ведущая организация: Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга.

Защита диссертации состоится " " 1995 г. в час. на заседании Специализированного совета Д-200.06.01 при Институте прикладной астрономии РАН (197042, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 8)

Отзывы на диссертацию направлять в адрес специализированного совета.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН

Автореферат разослан " " 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук А. Т. Байкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы, решаемой в работе следует из того, что:

1. Современное развитие наших знаний о природе физических процессов, происходящих в комете, одновременно с повышением точности наблюдений кометы, позволяет ставить и решать не только классические задачи определения орбитального движения, но и исследовать более тонкие эффекты, связанные с вращением ядра, с его фигурой. А это, в свою очередь, требует разработки быстрых и эффективных методов учета этих эффектов в наблюдениях комет.

2. Знание формы кометного ядра, параметров его вращения дает основу для:

а) более четкого понимания природы кометной активности;

б) выявления путей эволюции формы ядра кометы, и механизмов его разделения, связи комет и метеорных потоков;

в) получения оценок для времени существования кометных ядер и определение их возможной генетической связи с астероидами;

3. Дальнейшее развитие методик учета негравитационных эффектов - необходимое условие увеличения долгосрочности и точности численных теорий движения комет.

Научная новизна работы заключается:

1.В разработке новой эффективной методики учета негравитационных сил, действующих на ядро кометы, поверхность которого может быть аппроксимирована конечным числом членов ряда по сферическим функциям.

2. В разработке новой теории фотоцентра кометы.

3. В объяснении механизма образования, вытянутых кометных ядер.

4. В определении из астрометрических наблюдений кометы Галлея в появлении 1986 г. методом регуляризации параметров вращения и ор-

битального движения, а также коэффициентов полинома по сферическим функциям, представляющего фигуру поверхности ядра.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Построена численная теория поступательно–вращательного движения кометы Галлея в появлении 1986 г.

2. Построена модель распределения пыли в голове кометы. Показано, что в голове кометы существует точка относительного равновесия, в которой накапливается пыль. Точка расположена на линии комета - Солнце и асимптотически устойчива для движений вдоль линии комета - Солнце. Получена простая формула, позволяющая вычислять величину расстояния от этой точки до ядра кометы в зависимости от газопроизводительности и гелиоцентрического расстояния кометы.

3. Создан комплекс программ, позволяющий вычислять комплексные коэффициенты ряда по сферическим функциям при операциях: умножения, сложения, поворота и переноса системы координат. Разработаны программы вычисления вещественных коэффициентов разложения однозначной, конечной и непрерывной функции в ряд по сферическим функциям и связи с комплексным их представлением.

4. Разработана методика приближенного вычисления линии терминатора и функции тени для тела несферической формы, позволяющая получать соответствующие величины с использованием рядов по сферическим функциям.

5. Рассмотрена эволюция формы и вращения ядра кометы в рамках ледяной модели кометного ядра.

6. Проведена обработка нормальных мест кометы Галлея, включающих 7640 наблюдений на интервале 1909 - 1986 гг. с учетом разработанной в данной работе теории фотоцентра. Полученная орбита дает положение

кометы на 14 марта 1986 г.мало отличающееся от положения, определенного по результатам наблюдений кометы с борта космической станции "Вега-2" и имеющим формальную точность порядка 10 км.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Новая методика учета негравитационных эффектов, учитывающая поступательно–вращательное движение кометы.

2. Новая теория, объясняющая явление смещения фотоцентра комет и методика учета этого эффекта в позиционных наблюдениях комет.

3. Результаты исследования эволюции формы и параметров вращения ледяного кометного ядра.

4. Параметры фигуры, вращения и орбитального движения ядра кометы Галлея, определенные из обработки позиционных наблюдений кометы в появлении 1986 г.

Апробация диссертации

По содержанию диссертации были сделаны доклады: на 49 -й научной конференции Латвийского государственного университета, г. Рига, февраль 1990 г., на юбилейной конференции, посвященной 250-летию обсерватории Цельсия, июнь 1990 г., Уппсала (Швеция), на семинаре Физико–технического института РАН, на заседании астрометрического отдела в ГАО РАН, Пулково и совместном заседании астрометричиского и астрофизического отделов в ГАО АН Украины, на конференции "Кометы в пост–галлеевскую эру", апрель 1989 г.,Бамберг (ФРГ), на седьмом всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике, август 1991 г., Москва, на первой , второй и третьей международной конференции по позиционной и небесной механике, март 1991, октябрь 1992 гг., Валенсия (Испания), октябрь 1994 г., Куенка (Испания), на юбилейной конференции, посвященной памяти Н.Д.Моисеева и Г.Н.Дубошина, ГАИШ, 1993 г., на конференции по вопросам кометной космогонии, май 1993 г., Нижний Новгород, на конференциях " Компьютерные методы небесной механики" и " Теоретическая, прикладная и вычислительная небесная механика": ноябрь 1992, октябрь 1993 гг. ИТА РАН, на юбилейной международной конференции "Современные проблемы теоретической астрономии",ИТА РАН, июнь 1994 г., Санкт–Петербург, на заседании кафедры небесной механики Санкт–Петербургского госуниверситета, сентябрь 1994, на совместном заседании отделов небесной механики и физики планет ГАИШ, октябрь 1994 г., Москва, на 26 ежегодной конференции Американского астрономического общества по разделу планетные исследования, ноябрь 1994 г., Вашингтон (США).

Публикации.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 14 работах. В совместных публикациях [1*,8*] автору принадлежит алгоритм вычисления возмущенного вращательного движения и реализация вычислений. В работах [7*,9*] автору в равной доле с соавтором принадлежат идеи исследования и обсуждение результатов, кроме того, автору принадлежат алгоритм математической модели движения комет, процессов, на них происходящих, и результаты обработки наблюдений.

Объем и структура диссертации

Работа состоит из шести глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 205 страниц машинописного текста, в том числе 20 рисунков и 11 таблиц. В списке литературы 220 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор физических моделей кометного ядра и определение направлений исследования.

В последнее десятилетие наши знания о кометах, о процессах на них происходящих, значительно расширились. Резкому повышению интереса к кометам способствовали подготовка и проведение международного космического эксперимента – полета космических аппаратов к комете Галлея. Целая флотилия космических станций – советские "Вега 1" и "Вега 2", западноевропейская "Джотто", японская "Сунсей" (Планета–А) — исследовала комету Галлея. В ходе этих исследований были получены уникальные данные о составе и физических процессах, происходящих на ядре кометы, впервые с близкого расстояния было сфотографировано ядро кометы. Данные, полученные с космических станций, в основном, подвердили ледяную модель кометного ядра, разрабатываемую Ф. Уипплом с 1950 г. [11]. Согласно этой модели: ядро кометы представляет собой монолитный конгломерат льдов H_2O, NH_3, CH_4, CO_2 и C_2H_2, а также некоторое количество метеорного нелетучего вещества.

Три основных эффекта возникают вследствие сублимации кометного вещества и влияют на орбитальное и вращательное движение кометы:

а) реактивное давление на ядро кометы, вызывающее изменение орбиты и вращательного движения кометы;

б) изменение массы и формы кометного ядра;

в) смещение центра яркости кометы относительно ядра.

Анализ существующей литературы показал, что существующие теории и методики учета этих эффектов не всегда в полной мере позволяют объяснить наблюдательные данные.

2. Негравитационные ускорения в движении комет. Основные уравнения.

Сублимация кометного вещества вызывает реактивное давление на поверхность ядра, вызывающее изменение орбиты и вращения кометного ядра. Однако этим не исчерпываются особенности, связанные с описанием движения кометы. В силу того, что большинство комет имеют очень вытянутые орбиты, вероятность их сближения с большими планетами и астероидами велика. В момент сближения кометы с большой планетой, помимо классических возмущений, приходится учитывать "чисто" спутниковые возмущения, возмущения от несферичности планеты, возмущения со стороны спутников планет. В случае очень тесного сближения возможно и изменение вращательного движения ядра. Для описания вращательного движения кометы, было введено три системы координат [2]:

1) невращающаяся (Кенигова) система;

2) медленно вращающаяся система координат, связанная с вектором кинетического момента кометы;

3) вращающаяся система координат, жестко связанная с ядром кометы.

Оси вращающейся системы координат совпадали с главными осями инерции ядра. В качестве начала координат для всех трех систем был выбран центр инерции ядра.

Положение вектора кинетического момента в Кениговой системе координат фиксировалось двумя углами: ρ и σ. Положение системы 3 по отношению к 2 определялось тремя углами Эйлера, θ, ψ и ϕ.

Уравнения, описывающие изменение модуля кинетического момента L и углов $\rho, \sigma, \theta, \psi$ и ϕ были взяты в следующем виде [2]:

$$
\begin{aligned}
\dot{L} =& M_1, \dot{\rho} = \frac{M_2}{L}, \dot{\sigma} = \frac{M_3}{L\sin\rho} \\
\dot{\phi} =& L\cos\theta(\frac{1}{I_3} - \frac{\sin^2\phi}{I_1} - \frac{\cos^2\phi}{I_2}) + \frac{(M_2\cos\psi + M_3\sin\psi)}{L} \\
\dot{\psi} =& L(\sin^2\phi/I_1 + \cos^2\phi/I_2) - \frac{M_2}{L}\cos\psi\cot\theta - \frac{M_3}{L}(\cot\rho + \sin\psi\cot\theta) \\
\dot{\theta} =& L\sin\theta\sin\psi\cos\phi(1/I_1 - 1/I_2) + \frac{1}{L}(M_2\cos\psi - M_3\sin\psi)
\end{aligned},
\tag{2.1}
$$

где M_1, M_2, M_3 – компоненты вектора момента действующих сил.

3. Негравитационные ускорения и вращающие моменты, действующие на кометное ядро.

В этой главе описана использованная нами методика вычисления негравитационных ускорений и их моментов для кометного ядра. При разработке этой методики мы руководствовались двумя принципами:

а) математическое описание физических процессов, происходящих в ядре кометы, с учетом принятых предположений, должно быть достаточно строгим;

б) для получения результатов должны быть использованы преимущественно аналитические методы, так как сокращение машинного времени, достигаемое при этом, весьма важно в практическом отношении.

Основные предположения:

1) ядро кометы состоит из водяного льда,

2) форма поверхности ядра кометы близка к сферической и может быть аппроксимирована суммой конечного числа членов разложения по сферическим функциям;

3) сублимация водяного пара происходит со всей поверхности ядра, и ее интенсивность зависит от степени прогрева участков поверхности солнеч-

ной радиацией с учетом вращения ядра, поступательного движения комета по орбите и обмена энергией между поверхностью и внутренними слоями ядра.

Разработана методика расчета поля температуры для кометного ядра несферической формы. Для описания распространения тепла в ядре кометы расматривалась одномерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{DC}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t}(x, Q, \lambda, t) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, Q, \lambda, t), \tag{3.1}$$

где $T(x, Q, \lambda, t)$– температура ядра, x–координата, отсчитываемая по нормали от поверхности вглубь ядра, Q, λ– кометоцентрические полярный угол и долгота, t– время, D и C – плотность и теплоемкость вещества ядра, κ– коэффициент теплопроводности.

В качестве граничного условия для уравнения (3.1) на поверхности ядра использовалось выражение:

$$\frac{(1 - A_v)}{r^2} q_{\odot} \xi(Q, \lambda, t) = \Phi(T_s, t) - \kappa \frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0}, \tag{3.2}$$

где A_v – альбедо поверхности в видимой области спектра, r – гелиоцентрическое расстояние кометы, $q_{\odot}$ – солнечная постоянная для среднего расстояния Земли от Солнца (1а.е.), $\Phi(T_s, t)$ – суммарная энергия, уносимая с поверхности фотонами и испарившимися молекулами, за единицу времени, $T_s(Q, \lambda, t)$ – поверхностная температура в текущей точке поверхности ядра, определенной сферическими координатами Q, λ. Здесь величина $\xi(Q, \lambda, t) = \max(0, \cos z)$, где z – зенитное расстояние Солнца в текущей точке поверхности ядра, определенной сферическими координатами Q, λ.

В качестве второго граничного условия принималось требование изотермичности ядра кометы на глубине x_0.

Распространение потока тепла в кометном ядре, регулируется двумя периодами: 1) орбитальным периодом движения кометы, характеризующим изменение r, 2) периодом осевого вращения ядра, характеризующим изменение величины $\xi(Q\lambda, t)$. Так как орбитальный период много больше периода осевого вращения, то глубина прогрева ядра для этих периодов существенно разная. Это позволило рассматривать тепловые потоки независимо и выделить в текущей температуре две аддитивные компоненты:

$T_0(x,t)$ – компонента, соответствующая орбитальному периоду.

$\Delta T(x, Q, \lambda, t)$ – компонента, соответствующая текущему значению величины ξ для каждой точки поверхности.

Текущее значение температуры в точке с координатами x, Q, λ представлялось в виде суммы:

$$T(x, Q, \lambda, t) = T_0(x, t) + \Delta T(x, Q, \lambda, t) \tag{3.3}$$

При вычислении первого слагаемого в (3.3) использовалась обычная явная разностная схема, в которой шаг по времени был равен одному обороту кометы вокруг своей оси, а в качестве величины ξ бралось ее среднее значение на одном обороте (0.5).

Величина $\Delta T(x, Q, \lambda, t)$ находилась в виде отрезка ряда по сферическим функциям, при этом использовалась явная схема конечноразностных аппроксимаций, как и при вычислении $T_0(x, t)$, в которой вместо операций со скалярными величинами в узлах разностной схемы мы оперировали рядами по сферическим функциям.

На основании поля температуры вычисляется реактивный импульс и вращающий момент этого импульса, действующие на единичную площадку ядра, также в виде отрезков ряда по сферическим функциям.

Для реактивной силы, действующей на единичную площадку ядра, бралось выражение:

$$\Delta\overline{F}(Q,\lambda) = -\overline{n}\eta P_s(Q,\lambda) \tag{3.4}$$

где $\overline{n}(Q,\lambda)$ – орт внешней нормали поверхности ядра в точке со сферическими координатами Q и λ, η – коэффициент шероховатости поверхности, определяющий отношение между количеством молекул, создающих реактивный импульс, и общим числом сублимировавших молекул, P_s – давление насыщенного пара при температуре T_s.

При вычислении P_s– нелинейной функции относительно поверхностной температуры мы ограничились двумя первыми членами в разложении ее в ряд Тейлора в окрестности $T_0(0,t)$.

Умножив (3.4) векторно на $\overline{R}(Q,\lambda)$– разложение вектора положения точки, мы получили:

$$\Delta\overline{M}(Q,\lambda) = \overline{R}(Q,\lambda) \times \Delta\overline{F}(Q,\lambda), \tag{3.5}$$

где $\Delta\overline{M}(Q,\lambda)$ – момент реактивной силы, действующей на единичную площадку.

После чего интегрированием по всей поверхности были найдены негравитационная сила и вращательный момент, действующий на ядро. В нашем случае это $\overline{C}_{0,0}(\Delta F)$ и $\overline{C}_{0,0}(\Delta M)$ – коэффициенты разложений реактивной силы и момента реактивной силы, действующих на единичную площадку кометного ядра.

4. Особенности распределения пыли в голове кометы и кометный фотоцентр.

В этой главе рассматривается явление прямо не влияющее на поступательно - вращательное движение кометы. При сублимации вещества с поверхности кометы в ее кому (атмосферу кометы) выносится большое количество пыли. Образуется достаточно плотное облако газа и пыли (голова кометы), центр которого далеко не всегда совпадает с ядром кометы. Это может приводить к систематическим уклонениям в позиционных наблюдениях, которые могут интерпретироваться как негравитационные ускорения, что в свою очередь приводит к ненадежному прогнозу движения таких комет. В 1867г., во время прохождения кометы Свифт–Тутль через перигелий, некоторые наблюдатели отмечали даже возникновение яркого вторичного ядра. Анализ астрометрических наблюдений этой кометы показывает наличие в $O-C$ колебаний, вероятно, связанных с вращением ядра кометы [1].

Как показывают исследования спектров, в общую яркость кометы значительный вклад вносит пылевая компонента, определяющая непрерывный спектр с солнечными линиями поглощения. Общее количество пыли, выбрасываемое в кому, для некоторых комет даже превышает общее количество испарившегося газа. Так, по оценкам, сделанным с борта космического аппарата "Джотто", пылепроизводительность кометы Галлея в момент сближения с ней КА "Джотто" была равна 20 т. в секунду, а газопроизводительность – 18 т. в секунду. Современные данные указывают, что именно пыль является основной компонентой состава кометного ядра и определяет микроструктуру ядра.

Векторное дифференциальное уравнение движения пылевой частицы в голове кометы в кометоцентрической системе координат имеет вид:

$$\ddot{\overline{r}} = \sum_{i=1}^{4} \overline{W}_i, \tag{4.1}$$

где $\overline{W}_1, \overline{W}_2, \overline{W}_3$, и $\overline{W}_4$ – векторы возмущающих ускорений, определяемые соответственно световым давлением Солнца, торможением (или ускорением) от потока сублимирующего газа, притяжением ядра кометы и притяжением Солнца, $\overline{r}$– кометоцентрический вектор положения пылевой частицы.

Изучение распределения плотности пыли в голове кометы с целью поиска места возможных концентраций пылевых частиц естественно начать с изучения точек относительного динамического равновесия, где равнодействующая всех основных сил обращается в нуль. Задача существенно упрощается, если принять во внимание численные эксперименты, которые показывают что для широкого диапазона параметров, характеризующих физические свойства пылевых частиц и сублимируемого газа, преобладающими силами в динамике пылевой частицы в голове кометы являются сила светового давления Солнца и сила сопротивления (или подталкивания) газового потока.

Расстояние точки равновесия от центра инерции кометного ядра, r_E, удовлетворяет следующему соотношению:

$$r_E = r_s V \sqrt{\frac{C_d c \rho_0 R^2}{Q_d q_0}}, \tag{4.2}$$

где r_s – кометоцентрическое положение Солнца (задается в астрономических единицах), V – кометоцентрическая скорость потока газа, c – скорость света, q_0 – солнечная постоянная для среднего расстояния Земли от Солнца (1а.е.), Q_d – коэффициент, определяющий эффективность передачи энергии солнечного радиационного излучения пылинке, ρ_0 – плотность сублимируемого газа у поверхности кометного ядра, R – радиус ядра,

Эта точка равновесия расположена на линии комета–Солнце в сторону Солнца.

Отметим, что величина r_E не зависит от массы частицы и площади ее миделя. Поэтому для частиц всех размеров, для которых коэффициенты лобового сопротивления C_d и взаимодействия с солнечной радиацией Q_d близки, r_E будет иметь практически одинаковое значение.

Положение равновесия оказывается асимптотически устойчивым для движений вдоль линии комета–Солнце, так как действительные части корней характеристического уравнения для движения пылинок в окрестности равновесия имеют отрицательные значения. Естественным следствием асимптотической устойчивости равновесия является вывод о том, что частицы пыли могут накапливаться в точке равновесия, образуя относительно устойчивое пылевое облако.

Проделан ряд численных экспериментов. В частности была сделана оценка плотности распределения пыли по лучу зрения в голове кометы, при этом предполагалось, что количество пыли, выбрасываемое с единичной площадки ядра газом, пропорционально косинусу угла между нормалью этой площадки и направлением на Солнце. Кроме этого были рассмотрены случаи, когда на поверхности кометы есть пылевой джет, наблюдается кратковременное повышение пылепроизводительности, а также случай когда размер пылинок меняется, в следствие действия солнечной радиации.

Вычисления которые показали, что:

1) во всех рассмотренных случаях центр яркости распределения пыли смещен в сторону Солнца относительно ядра и направлению максимума выброса пылевого вещества с ядра кометы;

2) в некоторых случаях этот центр располагается недалеко от точки, в которой сумма всех действующих на пылинку сил равна нулю (точка равновесия);

3) в случаях, когда на поверхности кометы имеются джеты или участки поверхности с различным содержанием пыли, а также в случаях, когда пылинки делятся во время движения, возможно кратковременное образование ложного кометного ядра в районе точки равновесия, вследствие того, что в некоторые моменты времени в окрестности точки равновесия коли-

чество пыли будет больше, чем в окрестности ядра.

5. Об эволюции формы кометного ядра.

Большинство исследователей считало, что форма ядер комет близка к сфере. Только после того, как впервые комета Галлея была сфотографирована с близкого расстояния, были получены достоверные сведения о форме ее ядра. Оказалось, что это ядро имеет вытянутую форму. Вскоре появилась работа Джевитта и Мича [8], в которой утверждалось, что вытянутая форма ядра кометы скорее правило, чем исключение.

Возник вопрос о механизме образования таких ядер в ходе их эволюции. В данной работе мы предлагаем один из возможных механизмов образования вытянутых кометных ядер. Рассматривается следующая физическая модель кометы. Ледяное однородное ядро вращается вокруг оси и имеет близкую к сфере форму. При приближении кометы к Солнцу поверхность ядра нагревается и часть льда испаряется. При этом изменяется форма ядра. Другим эффектом сублимации кометного вещества является возникновение реактивных сил, действующих на ядро. Эти силы изменяют параметры вращательного движения кометы (влиянием реактивных сил на поступательное движение мы пренебрегаем). Исследованию эволюции формы и вращения ядра кометы в рамках этой модели и посвящена эта глава.

При проведении этого исследования мы ввели некоторые изменения в методику вычисления параметров вращательного движения и величины момента реактивных сил с целью ускорения процесса вычисления. В частности, для уменьшения затрат машинного времени, при вычислении количества молекул, сублимирующих с поверхности кометы, мы пренебрегли потоком энергии, уносимым с поверхности фотонами, и теплообменом между поверхностью и внутренними слоями. В этом случае число молекул, испарившихся с единичной площади в единицу времени определялось формулой:

$$Z_t(Q,\lambda) = \frac{1}{L}\frac{(1-A_{iv})}{r^2}q_{\odot}\xi(Q,\lambda), \tag{5.1}$$

где L – теплота, требующаяся на испарение одной молекулы сублиманта. Т.е. при таком предположении нет необходимости решать уравнение теплопроводности для вычисления величины Z_t и связанных с ней величинами рективной силы и момента реактивной силы, действующих на единичную площадку.

В качестве дифференциального уравнения, описывающего изменения радиуса вектора поверхности кометного ядра было взято уравнение вида:

$$\frac{dR(Q,\lambda)}{dt} = \frac{m}{D}Z_t(Q,\lambda), \tag{5.2}$$

где m– масса молекулы сублиманта, D – плотность поверхностного слоя кометы.

Величины Z_t и R искалась в виде отрезков ряда по сферическим функциям до 9 порядка включительно. В частности для R выражение имело вид:

$$R = \sum_{n=0}^{9}\sum_{k=0}^{n} P_n^k(\cos Q)\ [C_{n,k}\cos k\lambda + S_{n,k}\sin k\lambda],$$

Уравнения (5.1) и (5.2) совместно с уравнениями поступательного и вращательного движения ядра интегрировались численно методом Рунге–Кутта 4 (5). Поскольку при изменении формы изменяется и положение центра инерции, происходит также поворот главных осей инерции системы, то на каждом шаге интегрирования происходила проверка совпадения начала координат с центром инерции и подвижных осей с главными осями инерции. В случае невыполнения проверки (появление ненулевых коэффициентов $C_{1,0}, C_{1,1}, S_{1,1}$ в разложении радиуса ядра сигнализировало о смещении центра инерции поверхности кометного ядра, а появление ненулевых коэффициентов C_{21}, S_{21}, S_{22} в разложении сигнализировало о повороте главных осей инерции по отношению к подвижным осям). Процесс вычислений прерывался и выполнялась процедура приведения подвижной системы координат к центру инерции и главным осям инерции кометного ядра.

Проделан ряд модельных вычислений. Модельные вычисления показали, что изменения параметров поступательного движения из–за возмущений от планет и реактивной силы в наших модельных примерах не очень существенны. А поскольку нас интересовало главным образом изменение формы и вращения ядра, то вычисления проводились в предположении, что поступательное (орбитальное) движение ядра невозмущенное.

Были взяты следующие значения физических параметров: ядро кометы – ледяной, однородный шар радиуса $0.5 км$, с плотностью $0.9 г/см^3$ и периодом осевого вращения 2^d, ось вращения наклонена к плоскости орбиты на $72°$. Рассмотрены два варианта орбит: 1) круговая, с радиусом $r = 0.2 а.е.$; 2) эксцентрическая, с эксцентриситетом $e = 0.2$ и перигелийным расстоянием $q = 0.2 а.е.$

Выбор небольших значений радиуса круговой орбиты и перигелийного расстояния для вытянутой орбиты сделан с целью увеличения интенсивности сублимации на поверхности ядра. Кроме этого, проделаны модельные вычисления для случая, когда первоначальная фигура ядра – эллипсоид вращения.

Сравнение результатов вычислений для двух орбит показало, что для выбранной нами круговой модельной орбиты характерно достаточно длительное время стабильного вращения. За это время кометное ядро приобретает вытянутую форму. Затем в результате действия реактивных сил, а также в силу нестабильности вращения вокруг оси наименьшей инерции (вытягивание фигуры происходит вдоль оси вращения) начинается быстрая эволюция Q, при этом величина S – отношение наименьшей оси к наибольшей относительно стабилизируется на значении 0.5.

Для орбиты с большим эксцентриситетом сценарий эволюции угла Q и формы существенно другой. После небольшого периода стабильного вращения происходит поворот тела относительно Кениговой системы координат таким образом, что наибольшая ось ядра совершает колебания относительно плоскости орбиты. При этом процесс приобретения ядром кометы более вытянутой формы практически прекращается, и даже наоборот, идет вспять – ядро приобретает более шарообразную форму. После этого ядро опять делает поворот примерно на 90°, изменив положение по отношению к первоначальному примерно на 180°.

Показано, что полученные результаты об эволюции формы и вращении кометного ядра можно распространить, по крайней мере качественно, и на другие орбиты, из-за наличия масштабных множителей в уравнениях вращения и движения.

Результаты вычислений позволяют предположить следующий сценарий получения ядром короткопериодической кометы вытянутой формы. На первом этапе комета вращается на близ–круговой, достаточно далекой от Солнца орбите, приобретая вытянутую форму. После чего, каким либо внешним возмущением комета вовлекается в окрестность Солнца и в дальнейшем эволюция формы ядра практически прекращается. При этом возможны существенные изменения параметров вращения.

6. Определение формы и ориентации ядра кометы Галлея по оптическим и позиционным наблюдениям 1986 г.

В качестве основы для определения параметров поступательно–вращательного движения ядра кометы взяты наземные астрометрические наблюдения кометы на интервале 1985.10.09 – 1986.05.24. Выбор такого интервала наблюдений был обусловлен тем, что он покрыт достаточно плотно точными астрометрическими наблюдениями кометы, полученными на разных обсерваториях.

Принята следующая физическая модель ядра и процессов, происходящих на его поверхности:

1) ядро кометы - ледяное, с небольшими примесями других веществ; плотность ядра - 0.5 г.см ; поверхностное альбедо - 0.04;

2) поверхность ядра отличается от сферической и может быть аппроксимирована полиномом по сферическим функциям до 3 порядка включительно;

3) сублимация водяного пара происходит со всей поверхности в зависимости от степени прогрева участков поверхности Солнцем с учетом вращения ядра, поступательного движения кометы по орбите и обмена энергией между поверхностью и внутренними слоями ядра;

4)сублимация водяного пара вызывает два эффекта: а) реактивное давление на поверхность ядра кометы и, вследствие этого, возникновение негравитационного ускорения и момента реактивной силы, действующих на ядро кометы и вызывающих изменение орбиты и параметров вращения, б) смещение центра яркости кометы относительно ее ядра.

Возмущенное движение кометы вычислялось в два этапа. На первом этапе определялась суммарная реактивная сила и момент реактивной силы, действующие на ядро кометы, при этом движение центра масс кометы считалось невозмущенным. Уравнения вращательного движения ядра решались численно методом Рунге–Кутта 4(5) порядка. Одновременно с этим вычислялось распределение поверхностной температуры, которое представлялось в виде полинома по сферическим функциям. Исходя из вычисленной в каждый из моментов времени поверхностной температуры, вычислялась реактивная сила и момент реактивной силы.

На втором этапе уравнения орбитального движения кометы интегрировались численно методом Эверхарта 11 порядка с учетов вычисленнных значений реактивной силы.

В первом приближении ядро кометы считалось трехосным эллипсоидом с полуосями 8.0, 4.5, 3.5 км. Поверхность этого эллипсоида аппроксимировалась полиномом по сферическим функциям. Величина и ориентация вектора кинетического момента относительно орбитальной системы координат и относительно главных осей инерции ядра взяты из работы [7], а координаты и скорости - из работы [4].

В качестве неизвестных были взяты: 6 поправок к координатам и компонентам скорости центра инерции кометы, $\Delta\overline{r}$, $\Delta\overline{v}$ в начальный момент; 6 поправок к параметрам, характеризующим вращение ядра, ΔL, $\Delta\rho$, $\Delta\sigma$, $\Delta\varphi$, $\Delta\psi$, $\Delta\theta$, 16 поправок к коэффициентам полинома по сферическим функциям до 3 порядка, представляющего поверхность ядра,

$$R = \sum_{n=0}^{3}\sum_{k=0}^{n} P_n^k(\cos Q)\ [C_{n,k}\cos k\lambda + S_{n,k}\sin k\lambda],$$

D- постоянная смещения фотоцентра кометы относительно ядра.

Нормальная система уравнений для неизвестных составлялась по правилам метода наименьших квадратов, исходя из условных уравнений. Коэффициенты условных уравнений для поправок к координатам и скоростям вычислялись методом невозмущенных дуг [3]. Для остальных неизвестных коэффициенты вычислялись методом конечных разностей, сравнением смежных возмущенных траекторий. Постоянная D в условные уравнения не включалась; ее величина варьировалась с шагом 500 км. и выбиралось значение, дающее наименьшие невязки нормальных мест кометы.

Нормальная система для полного набора из 28 неизвестных оказалась плохо обусловленной. Были предприняты попытки решения такой нормальной системы различными методами, устраняющими плохую обусловленность: метод регуляризации Тихонова [5], метод сингулярных разложений [6]. Однако применение и этих методов приводило к решениям, в которых поправки к некоторым неизвестным были нереальны. Поэтому, кроме варианта с полным набором неизвестных, были рассмотрены варианты с меньшим числом неизвестных.

Таблица

Улучшенные координаты и скорости, параметры вращения и ориентации ядра, коэффициенты ряда, характеризующие форму ядра кометы Галлея и их ошибки.

Эпоха:14.0 Март 1986, TDT

$$x = -\,0.53828624 \pm 4.6 \cdot 10^{-8} \quad \dot{x} = -0.0244035612 \pm 19 \cdot 10^{-10}$$

$$y = -\,0.65445185 \pm 3.2 \cdot 10^{-8} \quad \dot{y} = \quad 0.0025373174 \pm 19 \cdot 10^{-10}$$

$$z = -\,0.31007898 \pm 3.4 \cdot 10^{-8} \quad \dot{z} = \quad 0.0061168514 \pm 26 \cdot 10^{-10}$$

$L = 9.51 * 10^{16} - (\text{кг м}^2\ \text{сек}^{-1})$ $\rho = 41^\circ.7 \pm 10^\circ.2$ $\sigma = 103^\circ.2 \pm 11^\circ.4$

$\varphi = 103^\circ.3 \quad -$ $\psi = 142^\circ.1 \pm 14^\circ.2$ $\theta = 25^\circ.6 \pm 13^\circ.1$

$C_{0,0} = 4.79\ - (\text{км})$ $C_{1,0} = 1.67 \quad - \quad (\text{км})$ $C_{2,0} = 1.67 \pm 0.29 (\text{км})$

$C_{2,2} = 0.42\ - (\text{км})$ $S_{3,2} = -0.18 \pm 0.19 (\text{км})$ $C_{3,3} = 0.07 \pm 0.08 (\text{км})$

$S_{3,3} = -0.12 \pm 0.07 (\text{км})$ $D = 1500\ - (\text{км})$

В Таблице приведено решение одного из таких вариантов. В этом варианте улучшалось 14 неизвестных, причем как метод сингулярных разложений, так и метод регуляризации дали близкие решения.

Если для параметра отсутствует указание на величину ошибки, это означает, что данная величина не улучшалась и в таблице дано ее принятое значение. Приведенная в таблице система параметров представляет нормальные места кометы Галлея в появлении 1986 г. со средней ошибкой единицы веса $\sigma = 0.78''$.

Полученная величина ошибки единицы веса σ, меньше, чем та, которая получается при применении методики Марсдена, однако примерно в 2 раза больше, чем средняя ошибка единицы веса одного нормального места. Это обстоятельство говорит о том, что принятая модель учитывает не все существенные факторы и требуются дальнейшие ее усовершенствования. Отметим, что решая поставленную в данном разделе задачу по наблюдениям только последнего появления, мы не имели возможности определить параметры, с которыми связаны долгопериодические и вековые изменения движения. По этой причине мы не стали включать в число неизвестных некоторые физические характеристики , в частности, величину тепловой инерции ядра, играющей важную роль в долгопериодическом изменении негравитационных эффектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты:

1.Разработана методика учета негравитационных сил, действующих на ядро кометы, поверхность которого может быть аппроксимирована конечным числом членов ряда по сферическим функциям.

2.Построена тепловая модель вращающегося несферического кометного ядра. Эта методика представляет собой комбинацию аналитического и численного подхода, в которой распределение температуры представляется в виде полинома по сферическим функциям, коэффициенты которого изменяются в зависимости от дискретных значений аргументов x и t, - координаты, отсчитываемой по нормали от поверхности вглубь, и времени соответственно. Преимущество методики в том, что ее можно применять при существенно нелинейных зависимостях температуры от x и t, когда чисто аналитический подход затруднителен. С другой стороны, вычисление распределения температуры по поверхности определяется исключительно операциями над коэффициентами разложения по сферическим функциям, что дает значительный выигрыш в снижении затрат машинного времени.

3.С учетом специфики определения поля температуры в виде отрезка ряда по сферическим функциям, разработана методика вычисления негравитационных сил и их моментов, действующих на ядро кометы несферической формы. Реактивные силы и их моменты определялись как суммарное реактивное давление сублимирующих молекул на поверхность ядра, интенсивность которого определяется поверхностной температурой.

В этом методе, как и при расчете температуры, распределение давления и направление его действия определяется в виде отрезков ряда по сферическим функциям, причем схема вычисления этих величин также полностью основана на операциях над коэффициентами разложения по сферическим функциям. Интегрирование этих разложений, описывающих давление и момент сил давления, действующих на поверхность, дает суммарный вектор реактивной силы и его момент с точностью до постоянных зависящих от нормировки; это - нулевые коэффициенты соответствующих разложений.

4.Построена модель распределения пыли в голове кометы. Показано, что в голове кометы существует точка относительного равновесия, в которой накапливается пыль. Точка расположена на линии комета - Солнце и асимптотически устойчива для движений вдоль линии комета - Солнце. Получена простая формула, позволяющая вычислять величину расстояния от этой точки до ядра кометы в зависимости от газопроизводительности и гелиоцентрического расстояния кометы. Вычисленные значения этого расстояния для кометы Галлея равны: 180 км. для доперигелийных наблюдений и 987 км. для послеперигелийных. Эти значения хорошо согласуются с величиной смещения фотоцентра, полученной из наблюдений этой кометы, и с тем фактом, что на доперигелийной дуге орбиты этой кометы смещение фотоцентра не было обнаружено.

С этим теоретически вычисленным значением величины смещения фотоцентра проведена обработка нормальных мест кометы Галлея, включающих 7640 наблюдений на интервале 1909 - 1986 гг. В результате вычислений была получена орбита, которая дает лучшее представление нормальных мест, чем орбита, вычисленная без учета этого смещения. Кроме этого, сравнение положения кометы, соответствующего этой орбите, с положением, определенным по результатам наблюдений кометы с борта космической станции "Вега-2" и имеющим формальную точность порядка 10 км., показывает близость указанных положений, и говорит о правильности принятых предположений о природе смещения фотоцентра.

Проделаны модельные вычисления для оценки плотности пыли в голове кометы по лучу зрения. Результаты численных экспериментов показали, что: а) во всех рассмотренных случаях центр распределения пыли смещен в сторону Солнца относительно ядра и направление смещения близко к направлению максимума выброса пылевого вещества с ядра кометы; б) в некоторых случаях этот центр располагается недалеко от точки, в которой сумма всех действующих на пылинку сил равна нулю (точка равновесия);

в) в случаях, когда на поверхности кометы имеются джеты или участки поверхности с различным содержанием пыли, возможно временное образование ложного кометного ядра в районе точки равновесия, вследствие того, что в некоторые моменты времени в окрестности точки равновесия количество пыли больше, чем в окрестности ядра.

5.Исследована эволюция формы и вращения ядра кометы в рамках ледяной модели кометного ядра. Для этого разработана методика учета влияния изменения формы кометного ядра на параметры его вращения. Изменение формы ядра кометы описывается изменением коэффициентов разложения радиуса поверхности в отрезок ряда по сферическим функциям. При изменении формы изменяются главные моменты инерции, происходит поворот осей инерции относительно первоначально выбранной подвижной системы, а также изменение положения центра инерции. Поэтому были предусмотрены соответствующие процедуры пересчета осей и центра инерции ядра.

Проделан ряд модельных вычислений. Показано, что ядро кометы на круговой орбите может приобрести вытянутую форму, в то же время для кометы на эксцентричной орбите такой процесс менее вероятен. Сделан вывод, что полученные результаты относительно эволюции формы и вращения кометного ядра можно распространить, по крайней мере качественно, и на другие орбиты. Предложена следующая схема образования вытянутых ядер короткопериодических комет. На первом этапе ядро движется по близкруговой, достаточно далекой от Солнца, орбите, приобретая вытянутую форму. После чего каким-либо внешним возмущением комета вовлекается в окрестности Солнца, и в дальнейшем эволюция формы ядра практически прекращается. При этом возможны существенные изменения параметров вращения.

6.Создан комплекс программ, позволяющий вычислять комплексные коэффициенты ряда по сферическим функциям при операциях: умножения, сложения, поворота и переноса системы координат. Разработаны программы вычисления вещественных коэффициентов разложения однозначной, конечной, непрерывной функции в ряд по сферическим функциям и связи с их комплексным представлением.

7.Описана методика вычисления линии терминатора и функции тени для тела несферической формы с использованием рядов по сферическим функциям.

8.Проанализированы наблюдения кометы Галлея в 1986г., показано, что их количество и качество позволяет решать не только классические задачи определения орбитального движения, но и исследования более тонких эффектов, связанных с вращением ядра, с его фигурой. Разработана методика определения параметров, характеризующих поступательное, вращательное движение кометы с одновременным определением параметров, описывающих форму кометного ядра из позиционных наблюдений.

На основании астрометрических наблюдений кометы Галлея сделана попытка определения 28 неизвестных: 6 поправок к координатам и компонентам скорости центра инерции кометы в начальный момент, 6 поправок параметров, характеризующих вращение ядра (модуля-вектора кинетического момента, двух углов, определяющих направление модуля-вектора кинетического момента в пространстве и трех углов Эйлера, определяющих ориентацию кометы относительно системы координат, связанной с вектором кинетического момента) и 16 поправок к коэффициентам сферического полинома до 3 порядка включительно, представляющих форму поверхности ядра. Нормальная система для полного набора из 28 неизвестных оказалась плохо обусловленной. Поэтому, кроме варианта с полным набором неизвестных, были рассмотрены варианты с меньшим числом неизвестных. В одном из вариантов, в котором улучшалось 14 неизвестных: 6 поправок к положению и скорости, к четырем углам, определяющим вращение, и 4 поправки к параметрам, характеризующим форму кометного ядра. Одновременно с ними варьированием была определена величина смещения фотоцентра в направлении максимального выброса вещества с поверхности. Определенные параметры представляют нормальные места кометы Галлея в появлении 1986г. со средней ошибкой единицы веса $\sigma = 0.78''$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1*. Батраков Ю. В., Медведев Ю. Д. 1992. О вращении астероида при его прохождении вблизи Земли – Труды Всесоюзного совещания "Астероидная опасность", С.–Петербург, стр. 129–133.

2*. Медведев Ю. Д. 1992. Определение терминатора несферического тела. – Тезисы всероссийского совещания "Компьютерные методы небесной механики", С.–Петербург, ИТА, 1992, стр. 51.

3*. Медведев Ю. Д. 1991. Негравитационные эффекты в движении комет. Седьмой всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике (аннотация докладов), Москва, стр. 244-245.

4*. Медведев Ю. Д. 1993. О смещении фотоцентра в наблюдениях комет. — Проблемы кометной космогонии, Нижн.Новгород, стр.40–45.

5*. Медведев Ю. Д. 1993. Об эволюции формы ледяного кометного ядра. — Проблемы кометной космогонии, Нижн.Новгород, стр.45–47.

6*. Медведев Ю. Д. 1993. Динамика пылевых частиц в голове кометы. — Международная конференция "Современные проблемы теоретической астрономии" ИТА РАН, С.–Петербург, стр. 86–87.

7*. Batrakov Yu. V., Medvedev Yu. D. 1990. On determining P/Halley nucleus form from astrometric observations 1990. — Proceed. of Nordic–Baltic Astronomy Meeting at the Astron. Observatory of the Uppsala Universi-ty, pp. 53–58.

8*. Batrakov Yu. V., Medvedev Yu. D. 1993. On changes of rotation of an asteroid moving near the Earth. — Proceed of the Second interna-tional workshop on positional astronomy and celestial mechnics, Valencia, pp. 91–97.

9*. Batrakov Yu. V., Medvedev Yu. D. 1993. Some results at research in dynamics of comets. — Proceed. of the conference on Astro-metry and Celestial Mechanics held in Poznan, Poland, 1993, Dynamics and Astrometry of natural and Artifical celestial bodies, pp. 263–268.

10*. Medvedev Yu. D. 1991. Nongravitational effects in cometary motion. — Proceed. of workshop on position Astronomy and Celestial Mechanics, held at Valencia, Spain, pp. 101–114.

11*. Medvedev Yu. D. 1993. Dust cloud in the comets head and its possible connection to the photocentre shift phenomenon. — Proceed. of the second international workshop on positional astronomy and celestial machanics held at Valencia, Spain, pp. 106–117.

12*. Medvedev Yu. D. 1993. On formation of elongated cometary nuclei. — Proceed. of the second international workshop on positional astronomy and celestial machanics held at Valencia, Spain, pp. 63–80.

13*. Medvedev Yu. D. 1994. Dynamics of dust particles in the cometary head. — Small bodies in the Solar System and their interactions with the planets (abstracts), held at Uppsala, p. 107

14*. Medvedev Yu. D. 1994. On dust cloud in comet's head and its role in forming the photocentre shift phenomenon. — Planet and Space Sci. (in

press).

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Батраков Ю. В., Кастель Г. Р., Макарова Е. Н., Медведев Ю. Д. 1993. Построение численной теории движения периодической кометы Свифта–Тутля на интервале 1737–1992 г.г. и прогноз расстояния в момент сближения ее с Землей в 2126г. – Проблемы кометной космогонии, Нижний Новгород, стр. 37–40.

2. Белецкий В. В. 1975. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле – Из–во Моск. унив., 308 стр.

3. Медведев Ю. Д. 1986. Об улучшении орбит комет, сближающихся с большими планетами, с учетом негравитационных эффектов. – Ленинград, 1986, 9 с. – Рукопись депон. в ВИНИТИ, N 2298–86.

4. Медведев Ю.Д. 1986. Определение орбиты кометы Галлея по наблюдениям 1835, 1910, 1986 гг. — Астрон. цирк., No.1445, стр.4–5.

5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. 1979. Методы решения некоторых некорреткных задач. — М: Наука, 1979, 285 стр.

6. Форсайт Д., Малькольм М., Моулер К. 1980. Машинные методы математических вычислений. – М: Мир, 1980, 279 стр.

7. Banaszkiewicz M., Szuatowicz S. 1989. Nonnegravitational effects for precessing cometary nuclei. — Asteroids, Comets, meteors III, Proc. of meeting held at Astron. obser. of Uppsala, pp.451–454.

8. Jewitt, D.C., Meech, K.J. 1988. Optical properties of cometary nuclei and a preliminary comparison with asteroids. - Astrophysical Journal, V.328, pp.974-986.

9. Whipple,F.L. 1950. A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. — Astrophysical Journal, V.111, pp.375-394.