РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

ЖЕЛЕЗНОВ Николай Борисович

# Поступательно-вращательное движение в системе двойного астероида и моделирование его световых кривых

Специальность 01.03.01
Астрометрия и небесная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2002

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук В.А.Шор

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Ю.В.Батраков

кандидат физико-математических наук Л.Л.Соколов

Ведущая организация:

Главная астрономическая обсерватория РАН

Защита состоится 1 июля 2002 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 в Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 197187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН.

Автореферат разослан "____"______________ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук З.М.Малкин

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы диссертации

Обнаружение и исследование двойных астероидов имеет важное значение для решения задач космогонии Солнечной системы. Результаты изучения таких объектов могут оказать существенное влияние как на понимание процессов, которые происходили на стадии формирования Солнечной системы, так и на исследовании ее дальнейшей эволюции. Большинство двойных астероидов, следы существования которых можно обнаружить на поверхности Земли, планет и спутников в виде двойных кратеров, образовались, по-видимому, в результате столкновения и распада родительских тел.

Заметная доля открытых к настоящему времени двойных астероидов принадлежит к классу астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) Поэтому обнаружение и изучение двойных астероидов имеет и практический интерес, связанный с проблемой астероидной опасности. Методики предсказания возможности столкновения одиночного астероида с Землей уже достаточно глубоко разработаны и в настоящее время широко используются. Движение же двойного астероида (ДА) более сложное. Помимо движения общего центра инерции по гелиоцентрической орбите здесь необходимо также учитывать обращение компонентов вокруг центра инерции. Поэтому знание элементов орбит компонентов, их формы, плотности, минералогического состава и других физических и динамических характеристик необходимо для предвычисления и предотвращения возможного столкновения ДА с Землей.

Двойные астероиды могут быть обнаружены при наблюдениях с помощью адаптивной оптики, при радарных наблюдениях или с борта космических аппаратов. Одним из наиболее перспективных на сегодняшний день методов обнаружения двойных астероидов является исследование их кривых блеска (световых кривых), поскольку при обычных наземных наблюдениях двойные астероиды, представляющие собой тесные двойные системы, в большинстве случаев не разлагаются на составляющие и видны как точечные объекты.

При фотометрических наблюдениях ДА обнаруживаются периодические колебания блеска, которые могут быть связаны как с вращением несферичных компонентов, так и с прецессией орбиты спутника и изменением аспекта. Световые кривые могут также содержать особенности, связанные с взаимными явлениями (покрытиями и затмениями). В настоящее время разработаны методики, позволяющие из анализа таких особенностей получать оценки некоторых важных характеристик ДА, таких как соотношение эффективных диаметров компонентов, отношение большой полуоси орбиты спутника относительно главного компонента к диаметру главного компонента, плотность компонентов и др. Тем не менее, по этим методикам параметры ДА определяются с большими ошибками, а существующие программы моделирования световых кривых, которые позволяли бы уточнять эти параметры, разработаны при использовании упрощенной модели ДА. Решение прямой задачи (построение световых кривых ДА по известным параметрам), позволяющее получать удовлетворительную аппроксимацию реальных наблюдений, сопряжено с определенными трудностями, которые связаны, например, с учетом несферичности тел, законами отражения. Необходимо также учитывать и сложное поступательно-вращательное движение несферичных компонентов.

## Цели работы

Разработка методики определения параметров ДА при аппроксимации реальных кривых блеска модельными, вычисленными с учетом сложного движения его несферичных компонентов, а также апробация данной методики на примере ДА 1996 $FG_3$.

## Научная новизна работы

1. Получено представление силовой функции гравитационного взаимодействия двух эллипсоидов в виде разложения по сферическим функциям до четвертой гармоники.
2. Для вычисления модельных световых кривых разработан оригинальный метод учета покрытий и затмений в системе двух эллипсоидальных тел.
3. Световые кривые ДА впервые изучены с учетом сложного поступательно-вращательного движения компонентов.
4. Исследована устойчивость движения компонентов ДА 1996 $FG_3$ на интервале в 3000 оборотов спутника, вычислен период прецессии плоскости орбиты спутника.
5. Проведено предварительное исследование движения компонентов ДА в предположении наличия колебаний плоскости орбиты спутника.

## Научная и практическая значимость работы

Работа представляет существенную практическую ценность, поскольку полученные в ней формулы, уравнения и результаты их исследования, разработанные алгоритмы и сделанные выводы применимы при решении достаточно широкого круга задач, связанных с исследованием поступательно-вращательного движения тел Солнечной системы и с моделированием их световых кривых.

## Результаты, выносимые на защиту:

1. Формулы для вычисления четвертой гармоники разложения силовой функции взаимного притяжения двух трехосных эллипсоидов по методу Г.Н.Дубошина; компактные формулы для вычисления моментов сил; уравнения поступательно-вращательного движения ДА, компоненты которого аппроксимируются трехосными эллипсоидами с учетом разложения силовой функции гравитационного взаимодействия тел по сферическим функциям до четвертой гармоники; результаты исследования применимости метода Эверхарта для интегрирования дифференциальных уравнений поступательно-вращательного движения ДА в поле тяготения Солнца; результаты исследования влияния гармоники четвертого порядка на движение и вращение компонентов.
2. Метод учета покрытий и затмений в системе ДА, компоненты которого аппроксимируются трехосными эллипсоидами; алгоритм моделирования кривых блеска и вычисления фотоцентра ДА путем разбиения поверхности эллипсоидов на элементарные площадки.
3. Найденные значения параметров орбиты спутника ДА 1996 $FG_3$ относительно главного компонента, средняя плотность компонентов и их размеры в рамках стандартной модели; уточненое значение плотности компонентов, период прецессии плоскости орбиты в случае сложного поступательно-вращательного движения компонентов ДА 1996 $FG_3$.

## Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах:

1. Всероссийская конференция с международным участием ¡Астероидная опасность — 95¿, СПб: ИТА РАН, 23–25 мая 1995 г.

2. Третья Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов, СПбГТУ, 4–11 декабря 1998 г.
3. 28-ая международная студенческая научная конференция, Екатеринбург, обсерватория УрГУ, 1–5 февраля 1999 г.
4. Четвертая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов, СПбГТУ, декабрь 1999 г.
5. 29-ая студенческая научная конференция, Екатеринбург, обсерватория УрГУ, 31 января – 4 февраля 2000 г.
6. Шестая Всероссийская Научная Конференция студентов-физиков и молодых ученых, Томск, ТПУ, 2–8 апреля 2000 г.
7. JENAM-2000, Москва, МГУ, 29 мая – 3 июня 2000 г.
8. Научная конференция ¡Новые результаты аналитической и качественной небесной механики¿, Москва, ГАИШ, 5–6 декабря 2000 г.
9. Пятая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов, СПбГТУ, 14–19 декабря 2000 г; Политехнический симпозиум: ¡Молодые ученые — промышленности северо-западного региона¿, ИМОП (СПбГТУ), 14 декабря 2000 г.
10. 30-ая студенческая научная конференция, Екатеринбург, обсерватория УрГУ, 29 января – 2 февраля 2001 г.
11. Всероссийская астрономическая конференция, СПбГУ, 6–12 августа 2001 г.
12. Рабочая встреча "Ceres 2001", Париж, IMCCE, 9–12 октября 2001 г.

Основные результаты работы докладывались также на научных семинарах ИПА РАН, НИИ ПММ при ТГУ (7 апреля 2000 г.), кафедры астрономии КГУ (4 февраля 2002 г.)

## Публикации и вклад автора:

Основные результаты работы изложены в 21 публикации, перечисленной в конце автореферата. В совместной с В.А.Шором работе [1] автору принадлежит разработка метода вычисления кривой блеска ДА с компонентами сферической формы, разработка программы построения световой кривой и визуализации движения компонентов ДА.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 131 странице, содержит 15 таблиц и 33 рисунка. Список литературы включает 84 библиографические ссылки.

## Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, приведены структура и содержание диссертации, указаны печатные работы, в которых отражены основные результаты.

В **первой главе** дается краткий критический обзор современного состояния исследования двойных астероидов. В начале главы описывается история исследования двойных астероидов, а также указаны косвенные признаки их существования (двойные кратеры, покрытия звезд и т.д.). Далее дается информация об открытиях двадцати шести двойных астероидов и о методах их обнаружения. Приводится также краткая характеристика открытых систем. Особое внимание уделяется проблеме образования двойных астероидов (гравитационный захват в задаче трех тел, приливной распад и образование гравитационно связанной пары из обломков расколовшегося родительского тела и т.д.), приводятся оценки вероятности таких событий. В конце главы рассматриваются вопросы эволюции ДА и устойчивости его движения.

Во **второй главе** дан подробный вывод формул для вычисления члена пятого порядка разложения взаимной силовой функции двух однородных трехосных эллипсоидов в ряд по обратным степеням расстояния между их центрами по методу Г.Н.Дубошина. Последнее эквивалентно вычислению гармоник четвертого порядка в разложении силовой функции двух эллипсоидов по сферическим функциям. Формулы для вычисления гармоник четвертого порядка представлены в форме, удобной для программирования.

Рассматривается также вопрос разложения по сферическим функциям проекций момента сил взаимного притяжения двух эллипсоидов, которые используются в правых частях динамических уравнений Эйлера. Приводится вывод формул гармоник четвертого порядка разложения проекций момента сил.

В **третьей главе** исследуется задача поступательно-вращательного движения ДА, компоненты которого аппроксимируются однородными трехосными эллипсоидами, в поле тяготения Солнца. В качестве параметров, характеризующих ориентацию тел в пространстве, используются направляющие косинусы главных центральных осей инерции тела в инерциальной системе координат. Это позволяет избежать неопределенности типа деления ноль на ноль, которое может иметь место при нулевом угле нутации в правых частях динамических уравнений Эйлера в случае использования углов Эйлера в качестве параметров, описывающих ориентацию главных центральных осей инерции. Кинематические уравнения Эйлера заменяются соотношениями Пуассона. Уравнения поступательно-вращательного движения представлены в виде дифференциальных уравнений первого (36 уравнений) и второго порядков (24 уравнения).

Уравнения движения численно интегрируются методом Эверхарта. Проведено исследование применимости метода Эверхарта к интегрированию уравнений поступатель-вращательного движения. Найдено, что использование дифференциальных уравнений движения второго порядка предпочтительней в сравнении с уравнениями первого порядка. Определен оптимальный порядок интегрирования (степень аппроксимирующего полинома), равный 19.

Рассмотрено влияние гармоники четвертого порядка на движение гипотетического ДА, параметры которого взяты произвольным образом. При сравнении результатов интегрирования на интервале времени в пять оборотов спутника в случаях ограничения разложения силовой функции соответственно нулевой, второй и четвертой гармониками, оценено, что влияние четвертой гармоники достигает порядка 10% от влияния гармоники второго порядка.

**Четвертая глава** посвящена разработке метода учета покрытий и затмений в системе ДА при вычислении звездной величины ДА на основе методики разбиения поверхности тела на элементарные площадки (фасеты).

Вначале рассматриваются системы координат, необходимые при разработке метода: ¡эллипсоидальная¿, оси которой жестко связанны с главными центральными осями энерции эллипсоида, ¡бесселева¿, ось $Z$ которой направлена на Землю или на Солнце, и эклиптическая. Приводится вывод матриц перехода из одной системы координат в другую, содержащие тригонометрические функции углов Эйлера ориентации эллипсоида и эклиптических координат его центра.

Далее приводится вывод параметрических уравнений эллипсоида, связывающие между собой сферические координаты точки на поверхности эллипсоида и ее прямоугольные координаты в бесселевой системе. Эти уравнения необходимы для вывода уравнения миделя, используемого в методе учета покрытий и затмений. Затем приводится вывод формул для вычисления косинусов углов падения и отражения света.

Миделево сечение (мидель) — проекция эллипсоида на плоскость, перпендикулярную лучу зрения. В этой главе получено уравнение миделя в бесселевой системе координат:

$$(K_1K_3 - K_5^2)X^2 + (K_2K_3 - K_6^2)Y^2 + 2XY(K_4K_3 - K_5K_6) = K_3(abc)^2,$$

где $K_i$ $(i = 1, \ldots, 6)$ — известные коэффициенты, представляющие собой алгебраические выражения квадратов полусей эллипсоида $(a, b, c)$ и тригонометрических функций углов Эйлера, а $X$, $Y$ — координаты центра фасеты.

С помощью этого уравнения разработано условие покрытия или затмения точки на поверхности одного тела другим: координаты центра площадки первого эллипсоида относительно центра второго подставляются в уравнение миделя второго эллипсоида, в котором знак равенства заменен на знак меньше или равно. Если полученное неравенство выполняется, то считается, что вся площадка участвует в явлении.

Далее рассматривается задача разбиения поверхности эллипсоида на фасеты системой параллелей и меридианов, а также вычисления площади фасеты. Вычисление площади поверхности эллипсоида путем суммирования площадей фасет показало хорошее совпадение с результатами вычислений по пакету **Maple V**, работающему в среде *Windows*. Определен оптимальный шаг разбиения поверхности эллипсоида системой параллелей и меридианов относительно точности вычислений звездной величины и времени счета.

Приведен алгоритм метода учета покрытий и затмений при вычислении звездной величины ДА, который работает следующим образом. Освещенная Солнцем полуповерхность эллипсоидов в бесселевой системе координат разбивается на фасеты. Каждая фасета проверяется на условие покрытия или затмения другим эллипсоидом. Если фасета не участвует во взаимном явлении, то для нее вычисляются площадь, косинусы углов падения и отражения и на их основе освещенность, создаваемая фасетой на Земле. Затем все освещенности суммируются, и интегральная величина переводится в шкалу звездных величин по формуле Погсона.

Далее в главе рассматриваются законы рассеяния света, необходимые для вычисления освещенности. В частности, в данной работе использовались законы Ламберта, Ломмеля-Зеелигера и закон Хапке для гладкой поверхности.

Затронут также вопрос о применимости метода учета покрытий и затмений для вычисления фотометрического центра ДА. Приводится вывод формул прямоугольных координат фотоцентра в бесселевой системе координат.

Проведено тестирование метода моделированием кривых блеска гипотетического ДА, а также аппроксимацией реальных фотометрических наблюдений двойной планеты Плутон-Харон модельными кривыми блеска.

В **пятой главе** содержатся результаты аппроксимации реальных кривых блеска ДА 1996 $FG_3$ и исследования сложного поступательно-вращательного движения его несферичных компонентов. Описан метод определения физических и динамических параметров из световых кривых.

С целью определения параметров системы сначала рассматривалась упрощенная модель ДА, в которой экваториальные плоскости компонентов и орбитальная плоскость спутника совпадают, а спутник движется по кеплеровой орбите вокруг главного компонента.

Из долгопериодической составляющей кривой блеска (составная часть световой кривой, из которой исключены колебания блеска, связанные с вращением главного компонента) методом наименьших квадратов (МНК) определены элементы орбиты спутника относительно главного компонента, средние диаметры компонентов и их плотность. Затем из полной кривой блеска с помощью МНК определена форма компонентов.

Далее приводятся результаты исследования движения ДА 1996 $FG_3$ с учетом второй и четвертой гармоник разложения гравитационного потенциала. Показано влияние сложного движения компонентов на световые кривые. Доказано, что неучет несферичности компонентов в их движении при аппроксимации световых кривых приводит к завышению определяемого значения плотности компонентов. Уточнено значение плотности компонентов ДА 1996 $FG_3$.

Исследовано поступательно-вращательное движение этого объекта на промежутке времени в 3000 оборотов (около 2000 суток). Наличие вековых изменений значений динамических параметров, за исключением прецессионого движения некоторых из них, выявлено не было. Период прецессии восходящего узла орбиты спутника оценен в 25 лет, и сделан вывод о влиянии этой прецессии на световые кривые.

В конце главы рассматривается более точная модель ДА с колеблющейся плоскостью орбиты спутника. На основании проведеного численного эксперимента показано, что колебания орбитальной плоскости спутника, сопровождающиеся колебаниями наклона орбиты с амплитудой около $2^\circ$, способны вызвать заметные изменения световых кривых.

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы работы.

## Основные результаты опубликованы в работах:


1. Железнов Н.Б., Шор В.А. 1995. Компьютерная программа для вычисления кривых блеска двойных астероидов. *Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием ¡Астероидная опасность — 95¿*, СПб: ИТА РАН, Т.1, с.23–25.
2. Железнов Н.Б. 1998. Численное интегрирование уравнений поступательно-вращательного движения двойного астероида. *Тезисы докладов ¡Третьей Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов¿*, СПб: СПбГТУ, с.47.
3. Железнов Н.Б. 1998. Численное моделирование кривых блеска двойных астероидов. *Тезисы докладов ¡Третьей Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов¿*, СПб: СПбГТУ, с.47.
4. Железнов Н.Б. 1999. Сведения о тесных двойных системах в Солнечной системе. *Тезисы докладов 28-ой международной студенческой конференции ¡Физика космоса¿*, Екатеринбург: УрГУ, с.44.
5. Железнов Н.Б. 1999. Численное интегрирование уравнений поступательно-вращательного движения двойного астероида. *Тезисы докладов 28-ой международной студенческой конференции ¡Физика космоса¿*, Екатеринбург: УрГУ, с.45.
6. Железнов Н.Б. 1999. Численное моделирование кривых блеска двойных астероидов. *Тезисы докладов 28-ой международной студенческой конференции ¡Физика космоса¿*, Екатеринбург: УрГУ, с.46.
7. Zheleznov N. 1999. The research of prograde-rotational motion of binary asteroids and their lightcurves. *ACM Conference Abstracts*, Cornell University, USA.
8. Железнов Н.Б. 1999. Моделирование движения двойного астероида: кривые блеска и смещение фотоцентра. *Тезисы докладов ¡Четвертой Санкт-Петербургской Ассамблеи молодых ученых и специалистов¿*, СПб: СПбГУ, с.50.
9. Железнов Н.Б. 1999. Вычисление члена пятого порядка разложения силовой функции двух эллипсоидальных тел по обратным значениям

их взаимного расстояния. *Труды ИПА*, СПб.: ИПА РАН, вып.4, с.261–272.

10. Железнов Н.Б. 1999. Численное интегрирование уравнений поступательно-вращательного движения двойного астероида. *Труды ИПА*, СПб.: ИПА РАН, вып.4, с.272–290.

11. Железнов Н.Б. 1999. Метод учета взаимных покрытий и затмений в системе двойного астероида при решении фотометрических задач. *Сообщения ИПА РАН*, 131, СПб.: ИПА РАН.

12. Железнов Н.Б. 2000. Исследование двойственности астероида 1996 FG3. *Труды 29-ой студенческой конференции ¡Физика Космоса¿*, Екатеринбург: УрГУ, с.117.

13. Железнов Н.Б. 2000. Исследование двойственности астероидов 1991 VH, 1994 AW$_1$, 1996 FG$_3$. *Тезисы докладов ВНКСФ-6*, Екатеринбург-Томск, с.370–371.

14. Zheleznov N.B. 2000. Research of binarity of asteroids 1991 VH, 1994 AW1, 1996 FG3. *Abstracts of JENAM-2000*, Moscow, c.90.

15. Железнов Н.Б. 2000. Исследование двойственности астероидов 1991 VH, 1994 AW1, 1996 FG3. *Сборник докладов ¡Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века¿*, СПб: ИПА РАН, с.270–271.

16. Железнов Н.Б. 2000. Определение орбитальных и физических характеристик двойного астероида 1996 FG3. *Тезисы докладов ¡Пятой Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов¿*, СПб: СПбГТУ, с.36.

17. Железнов Н.Б. 2000. Определение орбитальных и физических характеристик двойного астероида 1996 FG3. *Тезисы докладов научной конференции ¡Новые результаты аналитической и качественной небесной механики¿*, Москва, с.37.

18. Железнов Н.Б. 2001. Определение орбитальных и физических характеристик двойного астероида 1996 FG$_3$. *Труды XXX-й студенческой конференции ¡Физика космоса¿*, Екатеринбург, УрГУ, с.188.

19. Железнов Н.Б. 2001. Исследование двойного астероида 1996 FG3. *Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции*, СПб: СПбГУ, с.66.

20. Zheleznov N. 2001. Research of binary asteroid 1996 FG3. *Proceedings of Workshop "Ceres 2001" (9–12 October, Paris).*

21. Железнов Н.Б. 2002. Исследование двойного астероида 1996 FG3. *Сообщения ИПА РАН,* 147, СПб.: ИПА РАН.