

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Спутники астероидов

В.В. Прокофьева, В.П. Таращук, Н.Н. Горькавый

В Солнечной системе открыто и занумеровано более 6000 астероидов, около 500 детально исследованы различными методами. В настоящем обзоре собраны наблюдательные свидетельства того, что не менее 10 % из них могут состоять из двух или более тел. Подтверждением этого явилось открытие с борта космического аппарата "Галилей" спутника у астероида Ида. Оно символизирует смену и наблюдательных, и теоретических парадигм. Наземные и космические наблюдения астероидов современными средствами могут дать новый богатый материал для построения моделей двойных астероидов. Рассмотрение проблемы стабильности, происхождения и динамики их спутников показывает, что сфера стабильного существования спутника достигает нескольких сотен радиусов астероидов. Высказано и обосновано предположение, что происхождение спутников астероидов может быть объяснено в рамках единой аккреционной модели образования спутников планет.

PACS numbers: 96.30.Ys

Содержание

1. Введение (661).
 2. История открытия астероидов, краткая характеристика их свойств (662).
 3. Наблюдательные данные о двойственности астероидов (663).
 - 3.1. Регистрация изображений астероидов и их спутников.
 - 3.2. Покрытия звезд астероидами и другие указания на двойственность астероидов.
 - 3.3. Фотометрические исследования астероидов.
 4. Определение периодов компонентов астероидов (672).
 - 4.1. Методика частотного анализа фотометрических данных.
 - 4.2. Тесная двойная система 87 Сильвия.
 - 4.3. Двойственность астероида 423 Диотима.
 - 4.4. Двухкомпонентная структура астероида 4179 Тютатис.
 5. Происхождение и динамика двойных астероидов и спутников астероидов (680).
 - 5.1. Космогонические модели: возможная смена теоретической парадигмы.
 - 5.2. Стабильность спутниковых орбит.
 - 5.3. Аккреционная космогония протоспутникового диска.
 - 5.4. Формирование спутниковых систем планет-гигантов.
 - 5.5. Рост спутников у планет "земной группы".
 - 5.6. Образование спутников астероидов.
 - 5.7. Эволюция спутников астероидов.
 6. Заключение (687).
- Список литературы (687).

1. Введение

В феврале 1994 г. с межпланетного корабля "Галилей" была получена сенсационная информация — астероид Ида (Ida) имеет спутник (рис. 1). Он был зарегистрирован в процессе двух независимых экспериментов [1, 2]. Это открытие стало одним из фундаментальных в многовековой истории исследований Солнечной системы. Оно позволяет по-новому взглянуть на астероиды и на космогонию Солнечной системы.

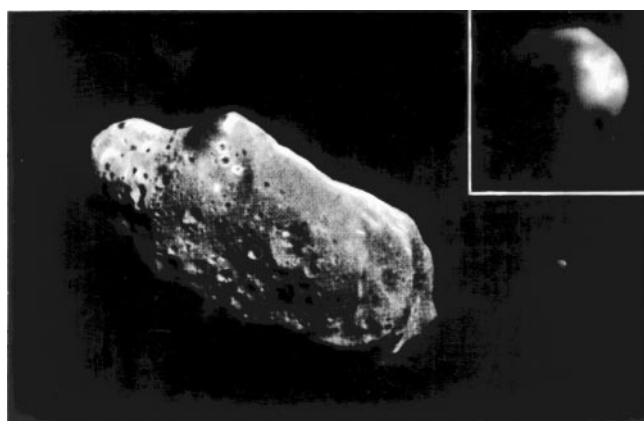


Рис. 1. Изображения астероида 243 Ида (Ida) и его спутника, переданные на Землю с космического корабля "Галилей". Спутник виден в виде небольшой точки справа от астероида. Увеличенное изображение спутника приведено на врезке

Астероиды, или малые планеты, наряду со спутниками больших планет, кометами и метеоритными телами составляют огромный класс малых тел Солнечной системы. Эти тела являются свидетелями начала

В.В. Прокофьева. Крымская астрофизическая обсерватория, 334413 Крым, пос. Научный, Украина
Тел. (065) 547-11-24, E-mail: prok@crao.crimea.ua
В.П. Таращук. Астрономическая обсерватория Киевского университета, 252053 Киев, Обсерваторная 3, Украина
Тел. (044) 216-19-94, E-mail: aoku@gluk.apc.org
Н.Н. Горькавый. Крымская астрофизическая обсерватория, 334242 Крым, Симеиз, Украина
Тел. (065) 477-13-70, E-mail: gorkav@catpeak.crimea.ua

Статья поступила 4 января 1995 г., после доработки 9 марта 1995 г.

эволюции Солнечной системы и хранят в себе информацию о составе первичного вещества протопланетного облака. Большинство малых планет расположено в пространстве между Марсом и Юпитером и составляет главный пояс астероидов. Этот пояс имеет сложную пространственную структуру и находится в состоянии непрерывной динамической эволюции, подвергаясь гравитационному воздействию больших планет. Границы между разными классами малых тел неопределенны. Многие спутники больших планет физически и по размерам неотличимы от астероидов; у некоторых астероидов, как у комет, наблюдается газовыделение, а многие кометы, покрывшись в процессе эволюции твердой корой, неотличимы от астероидов; между астероидами и метеоритными телами нет четкой границы, так как их размеры варьируют от километра до долей миллиметра (микрометеориты). Метеорные потоки, состоящие из микрометеоритов и пыли, вторгающиеся в земную атмосферу, могут быть связаны как с кометами (в большинстве случаев), так и с астероидами. Таким образом, вырисовывается картина тесной связи *всех* тел Солнечной системы.

В последние годы астероиды стали основным источником научных сенсаций в нашей планетной системе: 1) обнаружены первые представители второго пояса астероидов вблизи орбиты Плутона, их диаметры составляют несколько сотен км [3, 4]; 2) многочисленные наземные наблюдения свидетельствуют о существовании сложных по структуре астероидов — двойных или со спутниками [5]; 3) из космоса получены первые снимки астероидов Ида и Гаспра (Gaspra) [2]; 4) обнаружено большое число малых тел, испытывающих очень тесное сближение с планетами, что в случае Земли представляет потенциальную угрозу для существования биосферы [6]. Проблема астероидной опасности потеряла оттенок академичности после падения кометы Шумейкеров–Леви 9 на Юпитер в июле 1994 г., вызвавшего в его атмосфере грандиозный катаклизм. Это явление стало предметом серьезного обсуждения в научных и политических кругах [7, 8].

Обсуждению этой новой ситуации и посвящена настоящая работа. Мы намерены на основе обзора публикаций, наблюдений и собственных исследований:

- изложить наблюдательные данные, подтверждающие существование спутников у астероидов;

- показать пути исследования этого класса объектов с привлечением нового подхода к обработке и интерпретации наблюдений;

- рассмотреть теоретическую возможность существования мультикомпонентных астероидов;

- проанализировать те следствия, которые факт многокомпонентности астероидов вносит в современную картину представлений формирования Солнечной системы.

Мы остановимся только на двух аспектах "астероидной революции". Во-первых, следует пересмотреть широкораспространенный взгляд на астероиды как на монотела разных размеров. Двойственная природа астероидов или наличие у них спутников — не уникальное, а вполне закономерное явление. Во-вторых, астероиды должны рассматриваться вместе с большими планетами в рамках общих теорий. Это относится как к проблеме формирования спутниковых систем, так и к проблеме эволюции самих астероидов.

2. История открытия астероидов, краткая характеристика их свойств

Еще в начале XVII в. Иоганн Кеплер высказал предположение о том, что между Марсом и Юпитером должна существовать планета. Дж. Пиацци 1 января 1801 г. случайно открыл именно в этой области новое небесное тело. Но к 1807 г. были открыты еще три. Планетам дали названия Церера (Ceres), Паллада (Pallas), Юнона (Juno) и Веста (Vesta), их диаметры 1003, 608, 247 и 538 км. В дальнейшем оказалось, что вместо одной большой планеты пространство между Марсом и Юпитером заполнено большим количеством малых планет, названных за свой вид астероидами, т. е. звездоподобными. К настоящему времени открыто более 6000 астероидов. Первоначально открытым астероидам традиционно давали женские имена из греко-римской мифологии. Астероиды, обладавшие особенностями движения, получали мужские имена (например, группы троянцев, амурцев). По мере увеличения числа обнаруженных астероидов присвоение имени стало осуществляться в соответствии с фантазией первооткрывателей и последующим утверждением специальной комиссией Международного астрономического союза и присвоением им номеров. По некоторым оценкам в Солнечной системе может существовать не менее миллиона астероидов с размерами выше 1 км и с общей массой порядка $5 \cdot 10^{24}$ г.

Большая часть (99,8 %) астероидов сосредоточена в главном поясе между Марсом и Юпитером, имеющем форму тора. Большие полуоси орбит астероидов заключены в пределах 2,06–4,09 а.е., средняя полуось 2,7 а.е., средний эксцентриситет 0,14, средний наклон $9,5^\circ$. Орбитальная скорость движения астероидов — около 20 км/с, периоды обращения от 3 до 9 лет. Главный пояс астероидов имеет сложную внутреннюю структуру: расслоение на некоторое количество перекрывающихся колец, семейства, группы, струйные потоки со сходными динамическими или физическими характеристиками [9–11]. Сложные влияния гравитационных полей больших планет приводят к тому, что орбиты отдельных астероидов, оставаясь в целом устойчивыми в пределах пояса в течение 4,5 млрд лет, изменяются. Главную роль в этом процессе играет резонансное воздействие Юпитера, вследствие которого среди астероидов практически нет тел с периодами орбитального движения, кратными юпитерианскому: $1/2$, $1/3$, $2/5$ и $3/7$. Взаимные столкновения астероидов тоже вызывают изменение их орбит, дробление, переход в другое семейство или группу. Семейства как динамические образования имеют небольшой возраст, и возникновение их, видимо, связано с процессами столкновений астероидов. Поэтому они состоят из одного-двух крупных тел и большого количества малых и называются по имени главного тела.

Среди астероидов вне главного пояса следует отметить заплутоновый пояс. Интересная популяция малых тел с диаметром до 150–300 км существует между Юпитером и Ураном [12]. Первым из них был открыт Хирон (Chiron), считавшийся обычным астероидом до тех пор, пока у него не было зарегистрировано пыле- и газовыделение подобное кометным [13]. Необходимо также выделить очень важную группу астероидов, которые наряду с кометами и метеоритными телами, испытывают тесное сближение с Землей.

На протяжении длительного времени изучение малых планет в основном сводилось к их открытию и определению орбит. Физические исследования велись нерегулярно. Лишь постепенно стало ясно, что за исключением нескольких самых крупных астероиды имеют неправильную форму и весьма неровную, покрытую ударными кратерами, поверхность. В работе [14] проанализировано распределение по периодам вращения 249 больших (с диаметром более 55 км) и 267 малых астероидов. Распределение представлено двумя и тремя максвелловскими функциями для крупных и мелких астероидов со средними периодами вращения:

7,69 часа — 2/3 крупных астероидов,
11,82 часа — 1/3 крупных астероидов,
7,62 часа — 2/3 мелких астероидов,
19,51 часа — 13 % мелких астероидов,
3,88 часа — 21 % мелких астероидов.

Сделан вывод, что 66 % астероидов с периодами вращения 7,6–7,7 часа — это первичная популяция, а остальные астероиды испытали катастрофические соударения.

Изучение поляризации рассеянного астероидами солнечного излучения указывает на то, что поверхность многих из них, видимо, покрыта реголитом — раздробленным веществом, возникшим в результате частых столкновений астероида с небольшими телами и мелкими частицами. Отражательная способность астероидных поверхностей в различных длинах волн варьирует в больших пределах. Это означает, что состав астероидов весьма разнообразен. 75 % астероидов относят к классу С ("углистые"), они отражают всего 3 % падающего на них солнечного света и имеют альбедо 0,03. Более светлые астероиды класса S ("каменные" — их примерно 15 %) имеют альбедо 0,15. Астероиды разных классов не перемешаны и имеют тенденцию концентрироваться на определенных гелиоцентрических расстояниях. Так, светлые S-астероиды тяготеют к внутренней части пояса, темные С-астероиды — к внешней и существенного перемешивания за время их существования (4,5 млрд лет) не произошло. Это указывает на то, что уже в протопланетном газопылевом облаке происходила дифференциация вещества в соответствии с атомным и молекулярным весом, и имел место градиент химического состава.

В настоящее время разработаны различные типы классификаций астероидов, содержащих от нескольких до 15 классов [15–18]. Каждый класс характеризуется определенным набором физических параметров — таких как альбедо, цветовая характеристика, минералогический состав и др. Некоторые классы совпадают с таковыми у метеоритов, состав которых изучен достаточно хорошо. Минеральный состав вещества астероидов достаточно разнообразен, для некоторых характерно большое (до 50 %) содержание связанной воды. Астероиды главного пояса, представители заплутонового пояса могут содержать также летучие компоненты протопланетного облака подобно кометам. Как и у комет, у некоторых астероидов (класса S и сходных с ним) на поверхности могут присутствовать тонкие слои примитивных органических соединений, возникающих в результате радиационного воздействия. Существует немногочисленный класс М, астероиды которого содержат значительное количество металлов. Классификация астероидов базируется на

данных примерно 30 % известных астероидов и пока далека от завершения.

3. Наблюдательные данные о двойственности астероидов

Развитие наших представлений о малых телах Солнечной системы определяется в основном средствами наблюдений, которыми человечество обладает в данный момент. Для наблюдателей XIX в. астероиды выглядели в телескоп точечными объектами. Поэтому возникло и утвердилось представление об астероидах как о монотелах. Однако уже в начале XX в. появилось первое исследование астероида 433 Эрос (Eros), основанное на визуальных наблюдениях блеска, указывающее на его двойственную природу. Затем последовали немногочисленные наблюдения, полученные как визуально, так и фотографически, из которых также можно было бы сделать вывод о двойственной природе астероидов. Но эти факты были встречены недоверчиво и оставлены без внимания — они слишком противоречили общепринятым взглядам. Понадобилось несколько десятилетий разнообразных наблюдений и теоретических исследований для того, чтобы изменить сложившиеся представления. Рассмотрим, какие возможности и средства предоставляет современная наука и техника исследователям, и насколько реально получение информации о мультикомпонентности отдельных астероидов.

3.1. Регистрация изображений астероидов и их спутников

В настоящем разделе рассмотрим результаты и перспективы исследований сложной структуры астероидов различными прямыми методами: визуальным, фотографическим, а также при использовании электронных приемников оптического изображения. Разработанный в последние десятилетия спекл-интерферометрический метод извлечения информации из-под функции рассеяния света земной атмосферой позволяет повысить разрешающую способность при наземных наблюдениях и довести ее практически до разрешающей способности используемых телескопов.

3.1.1. Требования к методам прямой регистрации изображений. Задача исследований структуры астероидов методами прямой регистрации их изображений является достаточно сложной, так как угловое расстояние между компонентами составляет менее угловой секунды, а перепад яркости может достигать значительной величины. Например, у астероида Ида спутник в сотни раз слабее основного тела. Поэтому к применяемой аппаратуре, кроме высокой чувствительности, предъявляются три основных требования: высокое угловое разрешение, широкий динамический диапазон и возможность регистрации изображения слабого объекта рядом с ярким. Первое из них при наземных наблюдениях осуществляется за счет использования достаточно крупных телескопов, установленных в избранных точках земного шара, где отсутствие сильной турбулентности земной атмосферы позволяет получать изображения небесных тел с разрешающей способностью до десятых долей угловой секунды. Создание в последние десятилетия XX в. ряда крупных и оснащенных современным оборудованием обсерваторий на Гавайских и Канарских

островах, в Чили и в ряде других мест с превосходными астроклиматическими условиями практически исчерпывает возможности повышения углового разрешения путем выбора наилучшего места. Проблема дальнейшего повышения углового разрешения решается в настоящее время более сложными изощренными методами обработки полученной информации.

Два других требования практически являются требованиями к используемому приемнику света и частично связаны друг с другом, ибо невозможно регистрировать слабое изображение рядом с ярким, если не обеспечен широкий динамический диапазон характеристики свет-сигнал. Но, помимо последнего, в приемнике света должны быть исключены рассеяние света от яркого объекта и расширение его изображения, что присуще фотографии и некоторым электронным приемникам оптического изображения.

3.1.2. Визуальные, фотографические и электрофотографические наблюдения. Искусные наблюдатели при визуальных наблюдениях иногда замечали вытянутую форму некоторых астероидов. Первое сообщение о такой регистрации двойственности двух астероидов было опубликовано в 1926 г. При измерении расстояний между компонентами визуально-двойных звезд в диапазоне 0,18–0,30 угловой секунды с помощью 26,5-дюймового рефрактора обсерватории Йоганнесбурга были открыты "новые двойные звезды" с расстоянием между компонентами около 0,2 угловой секунды, которые в действительности оказались астероидами 433 Эрос и 2 Паллада [19]. При сближении с Землей в 1931 г. расстояние Эроса от Земли составило всего 28 млн км и в телескоп было видно, что у него удлинённая форма, напоминающая гантель, или неразрешённую двойную звезду с угловым расстоянием между компонентами 0,18", что составляло около 24 км.

В настоящее время визуальные наблюдения не проводятся, ибо считается, что они несут долю субъективизма. В то же время квантовая эффективность современных электронных приемников света приближается к чувствительности человеческого глаза и потребность в использовании последнего в качестве физического прибора постепенно отпадает.

В 1979–1980 гг. в Китае на высокогорных обсерваториях Пурпурная Гора и Юнань с помощью 0,6- и 1,0-метрового телескопов с временем экспозиции в несколько секунд на фотоэмульсии 103aO [20] на протяжении 13 ночей фотографировался астероид 9 Метиды (Metis), находившийся на расстоянии 1,23 а.е. от Земли. В течение 7 ночей была получена серия из 8 фотографий, имеющих достаточно высокое угловое разрешение. Расстояние между компонентами колебалось от 0,93 до 1,2". Положение изображения спутника изменялось с течением времени, и это дало возможность вычислить период обращения спутника вокруг астероида ($4,61^d$), большую полуось (1100 км) и координаты полюса орбиты. Последние оказались близкими к значениям координат, определенным для оси вращения Метиды. По оценкам общая масса системы равна $5 \cdot 10^{21}$ г, а средняя плотность $2,5 \text{ г см}^{-3}$ при значении диаметра Метиды 153 км. Диаметр спутника 60 км был оценен по разности блеска компонентов, равной 2^m . Эта величина согласуется с диаметром спутника 65 км, полученным из наблюдений покрытия им звезды 11 декабря 1979 г.

Отметим, что не все резервы фотографического метода были в данном случае исчерпаны. Существуют и широко применяются для наблюдений слабых звезд на фоне ночного неба специальные "глубокие" фотоэмульсии, например Кодак III aJ. Они имеют пороговый контраст 0,02, что в три раза лучше, чем у фотоэмульсии 103aO, использованной китайцами [21, с. 179], и позволяют регистрировать весьма малоконтрастные изображения, хотя имеют меньшую светочувствительность. Применение их на крупных телескопах, установленных в точках с хорошим астроклиматом, может обеспечить получение фотографий спутников у ряда астероидов в моменты, наиболее благоприятные для таких наблюдений.

Поиск изображений спутников астероидов на фотографических снимках неба был проведен Герельсом с соавторами [22]. Использовались материалы обзоров астероидов обсерваторий Йорк-Мак Дональд и Паломар-Лейден, имеющие проникающую способность 16,5 и $20,6''$ соответственно. Это позволяло получить на расстоянии 2,6 а.е. при величине геометрического альбедо 0,06 пороговую регистрацию объектов размером 17 и 3 км. Поиск слабых изображений спутников проводился для 10 астероидов на расстояниях от шести угловых секунд до семи угловых минут от них. Нижний предел (6 угл. сек.) определялся довольно низкой разрешающей способностью использованных снимков. Авторы сделали вывод: если у астероидов есть спутники, то они должны располагаться близко к ним. Лучшими кандидатами на двойственность, по их мнению, являются 624 Гектор (Hektor) и 216 Клеопатра (Kleopatra).

Электронная фотография или электрофотографический метод наблюдений, в течение нескольких десятилетий дававший в руки астрономов уникальный наблюдательный материал, обладает высокой квантовой эффективностью и позволяет уверенно регистрировать малоконтрастные изображения, обеспечивая пороговый контраст до 0,5% [20, с. 179]. Электронные камеры, в которых производится непосредственная регистрация каждого фотоэлектрона, позволяют регистрировать большие перепады яркости у близколежащих объектов. Простота физического принципа, заложенного в электронной фотографии, и прекрасная реализация его в ряде разработок, выполненных во Франции, Англии и СССР, давали в руки астрономов весьма малозумящие приборы, приближающиеся к идеальному приемнику света с квантовым выходом, равным квантовому выходу используемого фотокатода с внешним фотоэффектом.

Высокое качество преобразования оптического изображения в электронное делает электронную фотографию весьма перспективной для регистрации спутников астероидов. Можно быть уверенным, что применение такой аппаратуры на телескопе, установленном в хороших астроклиматических условиях и обеспечивающем высокое угловое разрешение, могло бы дать интересные результаты. В настоящее время на обсерваториях осталось мало таких приборов. Сложность их эксплуатации, отсутствие электрофотографических эмульсий и трудности извлечения фотометрической информации из полученных снимков — все это заставило астрономов искать новые методы. Появление CCD-матриц, являющихся одним из типов современных твердотельных приемников света, практически вытеснило электрофотографию из

области астрономических наблюдений, хотя, несомненно, есть задачи, решение которых было бы целесообразно именно с ее помощью. К такой задаче относится поиск спутников у астероидов, где решающим является получение изображения слабого спутника рядом со значительно более ярким астероидом.

3.1.3. Телевизионные и CCD-наблюдения. К телевизионным приемникам света по определению относятся приборы, обеспечивающие передачу оптического изображения на расстояние радиоэлектронными средствами. Телевизионная система осуществляет следующие физические операции: 1) преобразование оптического изображения, сформированного в фокальной плоскости телескопа, во временную последовательность электрических сигналов, или видеосигнал, 2) передачу этого сигнала на расстояние (например, от фокуса телескопа до регистрирующей аппаратуры) радиоэлектронными средствами, 3) обратное преобразование видеосигнала в оптическое изображение. Последнее может производиться не во время наблюдений, а после дополнительной обработки видеосигнала, который во время наблюдений регистрируется в цифровом виде в памяти компьютера. Из этого общего определения телевизионных систем следует, что широко распространенные CCD-матрицы являются по сути представителями класса телевизионных приборов: в их работе присутствуют все три характерных для телевидения преобразования.

Телевизионные системы для астрономических наблюдений делятся на два класса в зависимости от того, какой фотоэффект используется в светоприемном устройстве: внешний или внутренний [21]. К первому принадлежат все вакуумные передающие трубки, ко второму — все твердотельные передающие приборы как двумерные (матрицы), так и одномерные (линейки).

Необходимость преобразования оптического изображения в последовательность электрических сигналов усложняет наблюдательную систему, что приводит, по сравнению с электронной фотографией, к ограничению возможности получения изображения слабого объекта рядом с ярким. В разных классах приборов причины этого ограничения различны, но везде присутствуют либо увеличение размера яркого объекта (расплывание) или ореолы (иногда темные), либо расплывание изображения по строке в направлении считывания информации. Этот недостаток телевизионных приборов необходимо учитывать при постановке задачи прямой регистрации спутников астероидов. Наличие многообразных типов программ обработки изображений полей звезд, позволяющих автоматически обнаруживать движущийся относительно звезд объект, производить всевозможные редукции вплоть до восстановления контуров тесно расположенных звезд, изображения которых частично перекрываются, — все это существенно перевешивает имеющиеся недостатки.

Благодаря высокой квантовой эффективности, широкому динамическому диапазону, возможности регистрации контрастов, составляющих доли процентов, и обработке данных в памяти ЭВМ телевизионные приемники света и особенно современные CCD-матрицы, несомненно, являются перспективными приборами для исследований двойных астероидов.

Первый опыт поиска спутников у 10 астероидов ярче 10^m с помощью CCD-матриц был проведен в 1984–

1985 гг. на 0,9- и 1,54-метровом телескопах в США [22]. Матрица RCA имела 320×512 пикселей (светочувствительных элементов) размером 30×30 мкм и обеспечивала проникающую способность от 22 до 18^m в зависимости от используемого телескопа и его фокусного расстояния. Поиск проводился при разных фокусных расстояниях, что позволяло менять угловое разрешение. Экспонирование каждого исследуемого поля для исключения помех от расплывания изображения вдоль строки считывания производилось не менее двух раз, причем матрица при этом поворачивалась вокруг луча зрения на 90° . Авторы отмечают наличие ореола около яркого изображения, размер которого составлял 38 пикселей. Несомненно, сильно мешали также атмосферный ореол и рассеяние света в телескопах. Все это ухудшало порог регистрации слабых объектов в непосредственной близости от астероида.

Опыт указанной работы показал сложность таких поисков. Для успешной регистрации спутников должны быть использованы специально подготовленная аппаратура и телескоп с малым рассеянием света. Как правило, ореол рассеяния внутри оптики составляет около одного процента. Рассеяние в атмосфере может быть значительно больше, поэтому такие наблюдения можно проводить лишь в исключительно хорошие ночи. Недостатки матрицы, проявляющиеся в расплывании яркого изображения, можно преодолеть, только используя в фокальной плоскости телескопа специальное устройство для введения искусственной луны — с целью отвода в сторону основной части света исследуемого астероида.

3.1.4. Спекл-интерферометрический метод. Около 20 лет назад появился новый метод повышения углового разрешения при наземных астрофизических исследованиях на крупных телескопах — спекл-интерферометрия. Оптические неоднородности земной атмосферы, расположенные между исследуемым объектом и телескопом, обуславливают пятнистую (speckles) структуру изображения звезды, получаемого с очень малым временем экспозиции порядка сотых долей секунды в достаточно узком интервале длин волн. Создание различных типов высокочувствительных фотоэлектронных приемников света, позволяющих уверенно регистрировать пятнистую структуру изображений при использовании больших фокусных расстояний, обеспечило техническую возможность регистрации спеклов. Успехи когерентной оптики и исследования спекл-структуры рассеянного светового поля дали возможность Лабейри в 1970 г. [23] сформулировать физический принцип спекл-интерферометрического метода и через два года провести первые исследования звезд на 5-метровом телескопе [24].

Регистрация картины спеклов вначале производилась фотографированием ее изображения с экрана электронооптического преобразователя (ЭОП) [25], а затем был разработан ряд телевизионных систем, где информация обрабатывалась в ЭВМ непосредственно во время наблюдений. Созданный для 6-метрового телескопа телевизионный цифровой спекл-интерферометр [26] позволил провести массовые исследования двойных звезд, имеющих расстояния между компонентами от $0,812$ до $0,025''$, причем средняя квадратичная погрешность измерения расстояний составила $0,0026''$, а разница блеска компонентов не превышала 3^m [27]. При использовании крупных телескопов проникающая спо-

собность достигает около $16''$ [28], что позволяет обнаруживать спутники у астероидов главного пояса, имеющие размеры в десятки километров.

Опыт наблюдений ряда астероидов был проведен на 2,3-метровом телескопе Стюардской обсерватории в США [29]. Дифракционное разрешение телескопа составляло $0,05''$, а средняя квадратичная погрешность определения размеров астероидов — около $0,01''$. Согласно краткой информации [30] двойственная природа была подтверждена у астероидов 2 Паллада и 12 Виктория (Victoria). Астероид Эрос в момент наблюдений не показал четкого разделения на два компонента, но оказалось возможным определить размеры астероидного тела: $40,5 \times 14,5 \times 14,1$ км с погрешностью 2,5–3 км [31]. Эти размеры находятся в согласии с более ранними определениями. Наблюдения астероида 532 Геркулина (Herculina) дали размеры $263 \times 218 \times 215$ км и не обнаружили спутника размерами более 50 км, что в данном случае было пределом регистрации [32].

Таким образом, опыты спекл-интерферометрических исследований показали, что несмотря на перспективность нового и достаточно сложного метода он пока не дает уверенных результатов для регистрации двойственной природы астероидов. Это связано с методическими ограничениями, и в том числе с трудностью регистрации слабого объекта рядом с ярким. Поэтому для наблюдений спутников имеет смысл выбирать астероиды, у которых можно предполагать наличие достаточно крупного спутника и которые вращаются сравнительно медленно, позволяя получить достаточно длинные ряды спекл-интерферометрических наблюдений.

3.1.5. Радиолокационные наблюдения. Радиолокация астероидов стала реальностью после создания мощных радиопередатчиков и крупных радиотелескопов. Время запаздывания эхо-сигнала позволяет измерить расстояние до объекта, а доплеровское смещение по частоте — его скорость. Радиотелескоп с диаметром антенны 70 м позволяет получить разрешение в направлении локаций до десятков метров [33]. Вращение астероидов дает уширение отраженного ими эхо-сигнала. Данные таких наблюдений позволяют получить информацию о форме астероида [34, 35].

Впервые эхо-сигнал от астероида зарегистрирован в 1968 г. группой американских ученых [36]. Объектом был выбран астероид 1868 Икар (Icarus), приблизившийся к Земле на расстояние 0,04 а.е. К середине 1993 г. были проведены радарные наблюдения 37 астероидов главного пояса и 32 астероидов, приближающихся к Земле [33]. Запаздывание эхо-сигнала и его доплеровское уширение позволяют построить квазиизображение (радиоизображение) исследуемого астероида, где по вертикальной оси откладывается величина запаздывания, причем радар условно расположен сверху, а по горизонтальной — частота отраженного сигнала. Интенсивность сигнала образует третью координату, эквивалентную яркости изображения. Наблюдения в августе 1989 г. астероида 4769 Касталия (Castalia) на геоцентрическом расстоянии 0,037 а.е. дали указание на его возможную двойственность и позволили проследить его вращение в течение почти полного периода, равного 4,07 часа, что хорошо видно на рис. 2. С. Остро и др. [37] определили его размеры $1 \times 1,7$ км, плотность $2,6 \text{ г см}^{-3}$ и заключили, что он является контактной или почти контактной

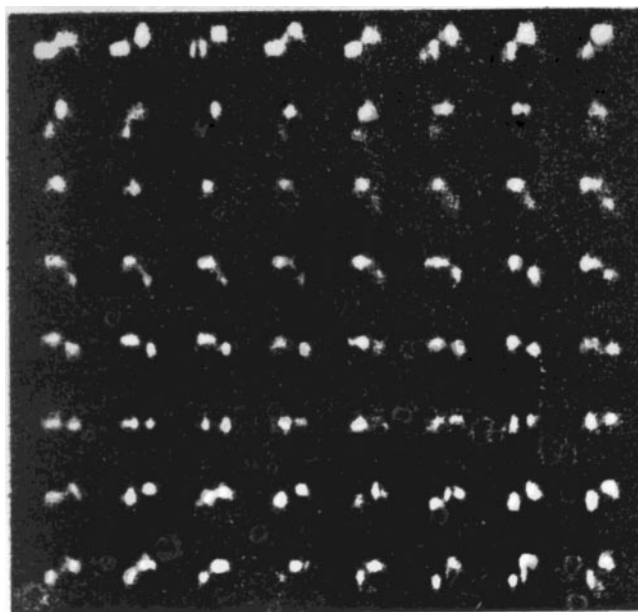


Рис. 2. Последовательные во времени 64 радиоизображения астероида 4769 Касталия (Castalia)

системой; если компоненты разделены, то расстояние между ними не более 100 м.

В декабре 1992 г. на минимальное расстояние 0,024 а.е. (3,6 млн км) к Земле приблизился открытый в 1989 г. астероид 4179 Тютатис (Tutatis), названный в честь божества галльских племен. Так как согласно элементам его орбиты он регулярно раз в четыре года приближается к Земле, для его изучения были задействованы всевозможные средства наблюдений. Радиолокационные наблюдения проводились двумя группами ученых [38, 39]. На рис. 3 приведены радиоизображения астероида Тютатис, полученные С. Остро и др. 8, 9, 10 и 13 декабря 1992 г. [40]. На них четко видны два компонента и неровная форма их фигур. В Европе 8 и 9 декабря того же года также были проведены радиолокационные наблюдения этого астероида [39]. Планетный локалатор Центра дальней космической связи, расположенный в Крыму под Евпаторией, посылал радиосигнал, а 100-метровая антенна, расположенная в г. Эффельсберг в Германии, принимала отраженный эхо-сигнал. Водородные стандарты частоты обеспечивали согласованность работы и высокую точность измерений: погрешность в оценке лучевой скорости составляла 0,03 мм/с. Отраженный астероидом сигнал дал два максимума (рис. 4), свидетельствующих о двойственной структуре объекта. Сравнение энергии в частях спектра, разделенных провалом, позволили оценить относительные размеры тел, образующих двойную систему. Площадь сечения в картинной плоскости меньшего из тел составила 70 % и 85 % от площади более крупного компонента по данным, полученным 8 и 9 декабря соответственно. Сделано предположение, что 8 декабря компоненты частично затеняли друг друга. Плотность пород поверхности астероида оценена величиной $1,5 \text{ г см}^{-3}$. А.Л. Зайцев и др. [41, 42] впервые обратили внимание на квазипериодические быстрые колебания отраженного астероидом сигнала и интерпретировали их как картину интерференции эхо-сигналов, отраженных от двух компонентов астероида. Если астероид двойной, то эхо-сигналы,



Рис. 3. Радиоизображения астероида 4179 Тютатис (Toutatis), полученные С. Остро и др. [33] 8, 9, 10 и 13 декабря 1992 г. (соответственно сверху вниз)

отраженные от некоторых участков поверхности разных компонентов, имеют одни и те же лучевые скорости. Это приводит к интерференции эхо-сигналов при определенной ориентировке положения компонентов астероида по отношению к лолятору.

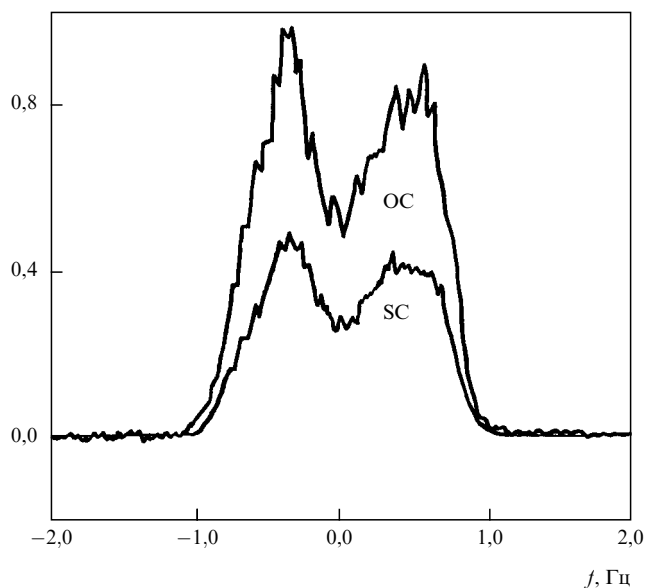


Рис. 4. Спектры мощности эхо-сигнала от астероида 4179 Тютатис, полученные при его локации группой европейских ученых [39] 9 декабря 1992 г. Сигнал OC для поляризации одного вращения нормирован на единицу, а сигнал SC противоположного вращения — на 0,5

Радиолокационный метод является, несомненно, очень перспективным в исследованиях сложной структуры астероидов, хотя пока не удалось получить четко разделенные эхо-сигналы от компонентов известных астероидов. Из 69 исследованных радиолокационным методом астероидов 8 (около 10 %) показали двойственную структуру на том или ином уровне достоверности [33, 43–45], причем обнаружение двойственности в большинстве случаев было неожиданным. Необходимо иметь в виду, что два компонента астероида будут регистрироваться четко, если их размеры сравнимы и обеспечивают уверенные эхо-сигналы, а их лучевые скорости заметно различаются. С. Остро [33] отмечает, что радиоантенны обсерваторий Аресибо и Голдстоун могут решить в течение десятилетия задачу оценки количества двойных астероидов в группе, пересекающей орбиту Земли. Отметим также, что при наблюдениях астероидов с малыми по размеру спутниками современные радиолокационные устройства, по-видимому, не могут дать положительного результата.

3.1.6. Наблюдения с борта космических аппаратов. Программа исследований астероидов с борта космических аппаратов была составлена более 20 лет назад. Целью ее является получение таких научных данных, которые недоступны для наземных обсерваторий. В значительной мере эти планы выполнены, и объем наших знаний существенно пополнился. В частности, напомним, что по ИК-наблюдениям определены альбедо и диаметры около 2000 астероидов, проведены спектральные наблюдения астероидов в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Запуск межпланетного космического аппарата "Галилей" позволил выполнить уникальные наблюдения. В 1991 г. впервые с близкого расстояния 16 000 км был сфотографирован астероид, мимо которого пролегал путь корабля. Им оказался ничем не примечательный астероид 951 Гаспра, открытый в 1916 г. крымским

астрономом Г.Н. Неуйминым [46] и названный в честь крымского поселка Гаспра, расположенного возле Ялты. В августе 1993 г. КА "Галилей" пролетел около астероида 243 Ида [1, 2]. Изображение самого астероида было принято на Земле в августе 1993 г. Из-за сложности и длительности передачи информации по каналу телеметрии остальная информация в течение нескольких месяцев хранилась на борту корабля. Изображение Иды со спутником было получено на Земле лишь в феврале 1994 г. Наличие спутника оказалось полной неожиданностью. Он был зарегистрирован независимо двумя инструментами: расположенной на борту телевизионной системой на матрице и инфракрасным спектрометром. Согласно сообщению Д. Моррисона [47], сделанному им в Гааге на XXII Генеральной Ассамблее Международного астрономического союза, спутник Dactyl имеет размер $1,6 \times 1,4 \times 1,1$ км и выглядит практически сферическим. Его спектр (и химический состав) явно отличаются от спектра самого астероида, имеющего размер $56 \times 24 \times 21$ км и вращающегося с периодом 4,63 часа. Расстояние от астероида до спутника составляет около 100 км. Определение орбиты было затруднено, хотя это имеет первостепенное значение для определения массы астероида и его плотности.

Наблюдения астероида Ида было в какой-то мере случайным — он просто находился вблизи траектории КА "Галилей", направившегося к Юпитеру. Из-за их высокой стоимости запланировать такие исследования для большого числа астероидов невозможно. Поэтому целесообразна разработка программ исследования структуры астероидов из космического пространства другими имеющимися средствами. Так, телескопы, работающие на орбите вокруг Земли и, в частности, телескоп Хаббла, обеспечивают получение снимков астрономических объектов с угловым разрешением, существенно большим, чем наземные телескопы. Атмосферная турбулентность не мешает космическим наблюдениям, а современная техника обеспечивает получение высококачественных изображений. Естественно, такие наблюдения более дорогие, и они должны дополнять исследования, проводимые в наземных обсерваториях, расположенных в наилучших астроклиматических условиях.

Имеются также планы посадки космического корабля на один из астероидов. Целью посадки является исследование состава поверхности, сейсмометрия, гравиметрия, непосредственные измерения температуры поверхности и, возможно, взятие проб грунта с целью доставки его на Землю для анализа. Обсуждается также возможность и допустимость космической миссии с доставкой на астероид ядерного заряда для последующего взрыва [8]. Обнаружение спутников у одних астероидов и двойственности других заставляют взглянуть на проблему посадки космического корабля на астероид с новой точки зрения.

3.2. Покрытия звезд астероидами и другие указания на двойственность астероидов

Обратимся к результатам многочисленных наблюдений, полученных во время прохождения астероидов между наблюдателем и какой-либо звездой (покрытий звезд), кратко рассмотрим генетическую связь между астероидами и сложными по структуре кометами, вырисовывающуюся в последние десятилетия, и укажем на такой фактор, свидетельствующий о существовании двойных астероидов, как наличие двойных кратеров.

3.2.1. Покрытия звезд двойными астероидами. Долгое время явления покрытий звезд астероидами (своеобразных затмений, видимых в определенных местах на Земле) не привлекали внимания, так как вычислительные средства не позволяли проводить их оперативный и точный расчет. Но с 1975 г. такие наблюдения получили широкое развитие для определения диаметров астероидов [48, 49]. Эти работы дали неожиданный результат: при регистрации покрытий звезд астероидами было обнаружено, что звезды затмевались не один раз, а два или даже больше, т.е. между наблюдателем и звездой в одном направлении проходило не одно тело, а несколько [50, 51]. Достоверность их несомненна, потому что обычно наблюдения проводились не только профессионалами, но и большой армией опытных любителей астрономии, располагавшихся внутри полос затмений и в непосредственной близости от них. Это увеличивало ценность наблюдений, так как по размерам и видимости тени можно восстановить форму затмевающего тела [52]. Дж. Мак Махон [53] наблюдал несколько кратковременных покрытий до и после основного покрытия звезды астероидом 532 Геркулина (Herculine), длящегося около 20 секунд. Размеры тел, дававших вторичный эффект, были меньше, чем у астероидов, и было высказано мнение, что они являются спутниками наблюдавшихся астероидов [54]. По данным нескольких наблюдателей оценены размеры самых крупных спутников: 20 км у Гебы (Hebe) и 46 км у Геркулины; последний находится на расстоянии 1000 км от астероида [51].

Пересмотр результатов более ранних наблюдений покрытий звезд другими астероидами позволил выявить возможное наличие спутников у астероидов 2 Паллады, 3 Юноны, 6 Гебы, 9 Метиды, 12 Виктории (Victoria), 129 Антигоны (Antigone), 433 Эроса, а также 18 Мельпомены (Melpomene) [49]. В последнем случае в 1978 г. три независимых фотоэлектрических и одно визуальное наблюдения позволили обнаружить кроме основного покрытия звезды несколько вторичных. Было сделано заключение, что помимо одного самого крупного спутника, движущегося на расстоянии не менее 750 км от главного тела, возле астероида существует облако мелких тел размером около 300 м [9, с. 91, 52]. В. Хартман в [54] приводит еще несколько астероидов, заподозренных в двойственности: 44 Низа (Nisa), 49 Палес (Pales), 171 Офелия (Ophelia), 24 Гектор. В 1982 г. во Франции в Медонской обсерватории с помощью различных методов, в том числе телевизионной камеры, проводились одновременные наблюдения покрытия звезды астероидом 146 Луциния (Lucina), в результате чего был найден спутник диаметром 6 км, находящийся на расстоянии 1600 км от центра главного компонента [55].

Результаты регистрации спутников астероидов при покрытиях ими звезд показали реальность существования сложных по композиции астероидов. Правы были Р. Бинзел и Т. Ван-Фландерн [49], предположившие еще в 1979 г., что наличие спутников у астероидов — обычное явление, и такие объекты достаточно многочисленны.

3.2.2. Сложная структура комет. Хорошо известно, что между многими астероидами и кометами наблюдается сходство, которое не может быть простой случайностью [56, 57]. Их динамические и физические свойства очень похожи. Короткопериодические кометы часто имеют орбиты, типичные для астероидов, а орбиты у некото-

рых семейств астероидов аналогичны кометным. В процессе физической эволюции, которая у комет протекает гораздо быстрее, чем у астероидов, на поверхности комет постепенно с потерей летучих веществ под воздействием солнечного излучения образуется тугоплавкая кора. Она препятствует дальнейшему испарению летучих компонентов, и в результате комета становится практически неотличимой от астероида. У некоторых астероидов наблюдалось газовыделение. Е. Тедеско и др. [58], основываясь на изучении орбиты астероида 1580 Бетулия (Betulia) и его своеобразной кривой блеска с тремя максимумами, предположили, что он является угасшей кометой. П. Вейсман и др. [57] привели список возможных кометоподобных астероидов, состоящий из 29 объектов. Среди них оказались несколько астероидов, имеющих признаки двойственности, например, 1580 Бетулия и 2201 Олджото (Oljoto). У ряда комет наблюдались двойные ядра (31 случай в [59]) или продолговатая, вытянутая форма околоядерной области, представляющая собой устойчивую систему. Все такие случаи собраны в монографии С.К. Всехсвятского [60]. В [58] Тедеско и др. отметили, что комета д'Арреста имела кривую блеска с тремя максимумами. Эта, а также ряд других комет, проявляют такие особенности, которые могут быть объяснены только с позиции существования у них ядра, состоящего из нескольких компонентов. Существование комет и астероидов, состоящих из двух или более компонентов, по-видимому, достаточно обычно для малых тел Солнечной системы [52]. Вокруг многих астероидов или комет в гравитационном поле может присутствовать облако спутников разных размеров вплоть до пыли.

3.2.3. Двойные кратеры. Практически все наблюдаемые поверхности планет, их спутников и малых тел в Солнечной системе покрыты кратерами, имеющими в основном ударное происхождение. Внимание исследователей давно привлекли структуры, состоящие из двух кратеров, расположенные в изобилии на Луне и Марсе. Такие образования присутствуют и на Земле. А. Воронов [61, 62], используя методы вероятностных расчетов (Монте-Карло, цепи Маркова), показал, что реальное количество двойных кратеров на поверхностях планет и спутников больше того, что должно быть при случайных событиях. Существует гипотеза, согласно которой они могли образоваться при ударном воздействии тел (астероидов, комет), состоящих из двух фрагментов. П. Хат и П. Вейсман [63] обсуждают именно такой сценарий. Х. Мелош и Дж. Стансбери [64], рассматривая образование ударных кратеров на Земле, пришли к выводу, что из 28 кратеров размером более 20 км три являются двойными. Были сделаны попытки объяснить их происхождение различными механизмами. Однако авторы считают наиболее вероятной гипотезу, по которой наличие двойных кратеров на Земле является следствием существования среди приближающихся к Земле тел значительного числа хорошо разделенных двойных астероидов.

3.3. Фотометрические исследования астероидов

3.3.1. Возможности современной фотометрии. Фотометрические наблюдения астероидов позволили получить информацию о периодах изменения их блеска, которые интерпретированы как периоды их вращения, о распо-

ложении оси вращения в пространстве, направлении вращения, а также об их форме в предположении, что она хорошо представляется трехосным эллипсоидом вращения. Каталог фотометрических характеристик астероидов [65–70] содержит данные более чем для 500 объектов.

Фотометрические наблюдения являются основой для развития методов решения обратных задач в астрономии, когда по полю рассеяния света каким-либо телом восстанавливается его форма. Задачи эти сложны, и, как правило, дают решение лишь при наличии каких-либо априорных данных. Сделаны попытки получить таким образом форму некоторых астероидов, считая их поверхность выпуклой [71]. В.В. Куприянов [72, 73] разработал методику решения обратной задачи для невыпуклых многокомпонентных твердых тел, которая позволяет учесть эффекты взаимного затенения компонентов и многократного отражения света от их поверхностей. Применение ее для исследований сложных по структуре астероидов, по-видимому, достаточно перспективно.

Основная масса наблюдений астероидов была получена с помощью электрофотометрии, базирующейся на использовании обычных звездных электрофотометров, позволяющих одновременно наблюдать только один объект. Сдвиг фотометрических данных, полученных в течение соседних ночей для одного и того же астероида, по шкале времени на величину, кратную периоду, позволяет получить так называемую составную кривую блеска, представляющую изменения блеска астероида в течение периода его вращения. Все фотометрические данные, представленные в виде составных кривых блеска, собраны в нескольких выпусках фотометрического каталога астероидов [74].

Прогресс техники астрофотометрических исследований привел сейчас к массовому использованию высокочувствительных двумерных приемников света (за ними утвердилось в русской астрономической литературе не совсем корректное название панорамных приемников света). Кроме получения изображений спутников астероидов, о чем говорилось выше, эти приемники позволяют одновременно измерять блеск всех объектов, находящихся в поле зрения, обеспечивают фотометрическую точность в сотые доли звездной величины и позволяют регистрировать предельно слабые объекты. Размер поля обычно составляет несколько угловых минут, что обусловлено сравнительно малыми линейными размерами таких приемников света.

Использование приборов новейшей электроники открывает ценную для исследования астероидов возможность одновременной регистрации блеска астероида и блеска одной или нескольких звезд поля. Блеск астероида в каждый момент наблюдения определяется относительно блеска звезд окрестностей, что позволяет проводить дифференциальные наблюдения и практически полностью исключать колебания прозрачности земной атмосферы в течение ночи. Высокая фотометрическая точность и большое количество измерений позволяют регистрировать на кривых блеска мелкие детали (например, в [75]), которые, возможно, несут сведения о наличии у астероида спутника. Чем выше точность, тем меньшие перепады яркости могут быть зарегистрированы и тем меньший по размеру спутник может быть обнаружен фотометрическими наблюдениями.

3.3.2. Фотометрические наблюдения двойных астероидов.

Первое свидетельство о существовании двойных астероидов было получено М. Андрэ [76] на основании визуальной фотометрии астероида 433 Эрос в феврале 1901 г., когда благоприятное взаимное расположение его и Земли позволяли зарегистрировать затменные явления. Кривая блеска имела два максимума, амплитуду около 2^m и была очень похожа на таковую у двойных звезд. Ее анализ позволил Андрэ определить ряд параметров двойной системы: период вращения астероида, равный 5 ч 16,15 мин, соотношение размеров двух эллипсоидальных компонентов $3/2$ или 1 при сжатии их около $1/2$, плотность $2,4 \text{ г см}^{-3}$, эксцентриситет орбиты спутника $0,569$, долготу периастра, отсчитываемую от линии узлов, 162° . Период вращения спутника он оценил близким к $7,7$ ч, а большую полуось, выраженную в радиусах планеты, — в $2,7$ радиуса астероида.

Известный исследователь переменных звезд В.П. Цесевич в 1937 г. [77], анализируя свои и опубликованные с 1901 г. фотометрические наблюдения Эроса, обнаружил реальные регулярные изменения положения его оси вращения в пространстве, а также изменения временного интервала между первичным и вторичным минимумами блеска. На основании этих фактов он высказал мнение о двойственности астероида. Бейер в [78] приводит сводку наблюдавшихся амплитуд переменности блеска Эроса от $0,2$ до $1,5^m$. Когда в 1975 г. Эрос приблизился к Земле на расстояние 26 млн км и амплитуда изменения блеска равнялась $1,5^m$ [79], для объяснения этого факта ему была приписана экзотическая форма гантели с соотношением продольной и поперечной осей $2,5:1$ (25×10 км) и осью вращения, лежащей в плоскости его орбиты.

Фотоэлектрические наблюдения астероида 624 Гектор, полученные Дж. Данлепом и Т. Герельсом в Чили [80], также показали большую амплитуду его переменности, достигающую $1,2^m$. Попытка объяснить ее неправильной формой тела длиной 110 км и поперечником, в $2,5$ раз меньшим, не выдерживает критики. А. Кук впервые отверг модель трехосного эллипсоида на основании получающейся при этом малой плотности $1,5 \text{ г см}^{-3}$ и предположил, что этот астероид может быть двойным [81]. С. Вайдениллинг [82] доказал неустойчивость вытянутой модели и предложил модель контактного двойного астероида: два компонента, эллипсоидальная форма которых обусловлена силами притяжения. На основании этой модели получена средняя для астероидов плотность $2,5 \text{ г см}^{-3}$ и хорошее соответствие с наблюдательной картиной. Е. Тедеско [83] на основании аномальной формы кривых блеска астероидов 49 Палес и 171 Офелия оценил параметры орбит спутников и также получил реальные для астероидов значения плотности в пределах $1,5\text{--}2,8 \text{ г см}^{-3}$.

Большое количество фотометрических наблюдений, указывающих на сложную структуру астероидов, и ограниченность объема обзора не дают нам возможности описать их результаты [84–86]. Мы приведем некоторые из них в следующем разделе при обобщении фотометрических признаков двойственности астероидов.

Современный уровень развития компьютерной техники и методов частотного анализа фотометрических данных позволяет использовать их для поиска скрытых периодичностей в колебаниях блеска астероидов и выделения периодов, создаваемых орбитальным движением и

вращением компонентов астероидов. Первые же опыты таких исследований показали интересные результаты [87, 5]. Методика частотного анализа фотометрических данных и результаты, полученные для трех астероидов, описаны в разделе 4. Частотный анализ позволил найти по несколько периодов для каждого из них, кроме известных, интерпретированных ранее как периоды вращения монолитного тела. Наличие мультипериодичности свидетельствует о сложной структуре астероидов, а найденные периоды могут быть интерпретированы как периоды вращения компонентов.

3.3.3. Обобщение фотометрических признаков мультикомпонентности астероидов.

Успехи фотометрических исследований астероидов, большое количество опубликованных кривых блеска и попытки выделения фотометрических признаков двойственной структуры астероидов, сделанные рядом авторов, а также наш опыт исследований двойных астероидов, позволяют нам обобщить и доработать эти признаки. Фотометрия астероидов дает в руки астрономов сведения о периоде (периодах) изменения их блеска и о поле рассеяния ими солнечного излучения, развертку которого мы можем наблюдать благодаря их вращению. Структура этого поля проявляется в форме и деталях кривой блеска астероида.

1. Амплитуда и форма кривой блеска дают нам несколько признаков двойственной или более сложной структуры астероидов. В конце 70-х гг. Тедеско [83] обратил внимание, что кривые блеска астероидов 49 Палес и 171 Офелия имеют практически плоские максимумы и алголеподобные минимумы, характерные для двойных звезд типа Алголя. На основании этого он сделал предположение об их двойственности, а также составил список еще 10 возможных двойных астероидов. Расчеты равновесных моделей двойных астероидов, выполненные в Италии в середине 80-х гг. [84], позволили по амплитуде кривой блеска астероида оценивать параметры его компонентов. Отметим, что для таких оценок используется наибольшее значение амплитуды кривой, наблюдавшейся близко к моменту прохождения Земли через экваториальную плоскость астероида, т.е. в тех условиях, когда амплитуда увеличивается за счет эффектов затенения компонентов друг другом. Амплитуда более одной звездной величины является критерием возможной двойственности астероида. Челино и др. [85], определяя параметры двойных систем для 10 крупных астероидов из формы их кривых блеска, сформулировали следующие признаки двойственности:

1) Существование плоского минимума на кривой блеска, свидетельствующего о полном затмении. Примером служит кривая блеска астероида 192 Навзикая (Nausikaa) (рис. 5), имеющая два плоских минимума.

2) Сильные изменения амплитуды кривой блеска от фазового угла освещения астероида Солнцем, что вызвано взаимным затеняющим эффектом, который различен при разных фазах.

3) Значительные изменения наклонов восходящих и нисходящих ветвей кривых блеска от цикла к циклу, вызванные изменяющимися моментами начала и конца затмений. В качестве примера на рис. 6 приведены две кривые блеска астероида 87 Сильвия (Sylvia), полученные с интервалом времени в двое суток. Изменились как амплитуда, что свидетельствует о существенных измене-

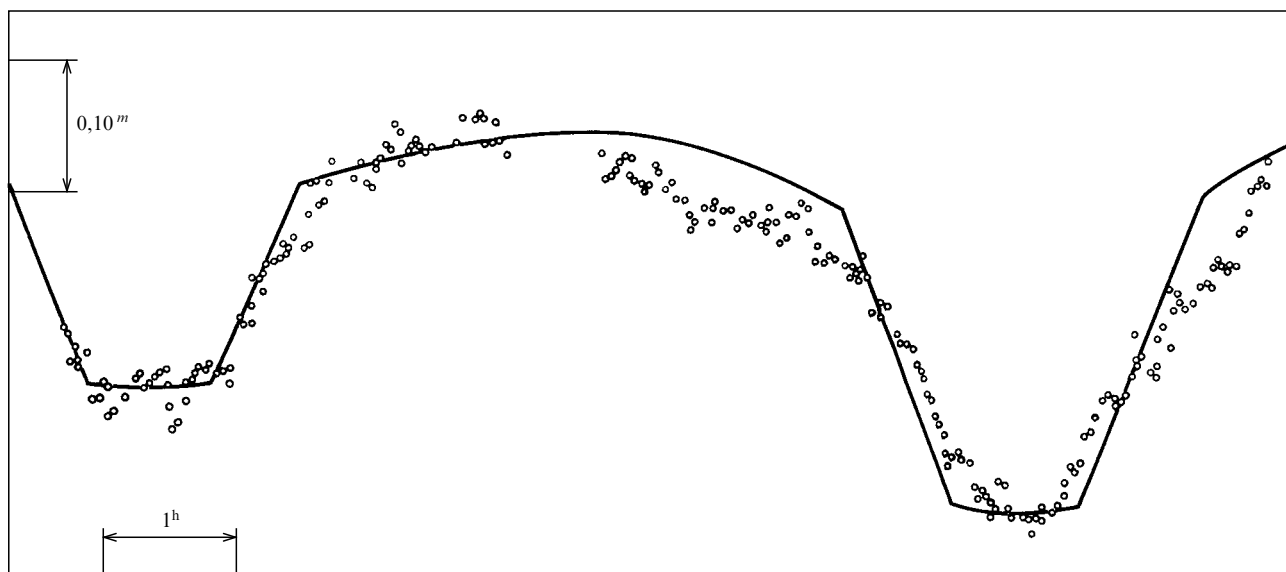


Рис. 5. Кривая блеска астероида 192 Навзикая (Nausikaa). Точки — наблюдения, кривая — модельный расчет, сделанный в [85] в предположении, что астероид двойной

ниях условий затенения компонентов, так и наклоны восходящей и нисходящей участков кривых блеска.

4) Наличие очень широкого максимума по сравнению с резкими узкими минимумами. Примером служит также кривая блеска астероида 192 Навзикая, приведенная на рис. 5.

Изменения амплитуды и формы кривой блеска являются наибольшими у тесных двойных астероидов, у которых компоненты сравнимы по размерам. Регистрация или обнаружение малого относительно основного компонента спутника затруднены по причине малой вероятности проведения наблюдений в момент затмения и малой величины эффекта затмения на кривой

блеска. Отметим также, что вероятность обнаружения далеко расположенного спутника также мала, ибо затмения непродолжительны и могут наблюдаться только, когда луч зрения лежит в экваториальной плоскости.

2. Определение положения оси вращения астероида производится по фотометрическим наблюдениям и обеспечивает точность в десятки градусов и лучше [67, 69]. Высокая точность определения координат полюса позволяет обнаружить реальные их изменения, как это было сделано В.П. Цесевичем для Эроса [77], что дает основание заподозрить наличие спутника, вызывающего прецессию оси вращения астероида.

3. Величина периода, как неоднократно указывалось различными авторами, может служить признаком возможной двойственности астероида. А. Харрис в 1983 г. высказал предположение, что астероиды главного пояса с периодами больше, чем двое суток, могут быть двойными системами [86]. Из расчетов равновесных моделей, выполненных Леоне и др. [84], следует, что двойными могут быть астероиды, периоды изменения блеска которых превосходят 6 часов. С периодами от 5 до 6 часов могут существовать как двойные астероиды, так и одиночные вращающиеся тела. Таким образом, величину периода можно рассматривать в качестве одного из признаков сложной структуры астероида.

4. Наличие мультипериодичности в изменениях блеска астероидов может свидетельствовать о двойственной или более сложной структуре астероида [87–94]. Периодов изменения блеска, как правило, должно быть более двух, ибо одно свободно вращающееся тело кроме периода вращения может иметь период так называемого эйлеровского вращения. Сложные по композиции астероиды показывают, как правило, несколько периодов: орбитального движения, вращения компонентов, прецессии осей орбиты и, возможно, осей вращения компонентов. Периоды вращения компонентов могут иметь гармоника разных порядков, которые появляются вследствие сложной поверхности астероида. Такое явление наблюдается при вращении искусственных спутников

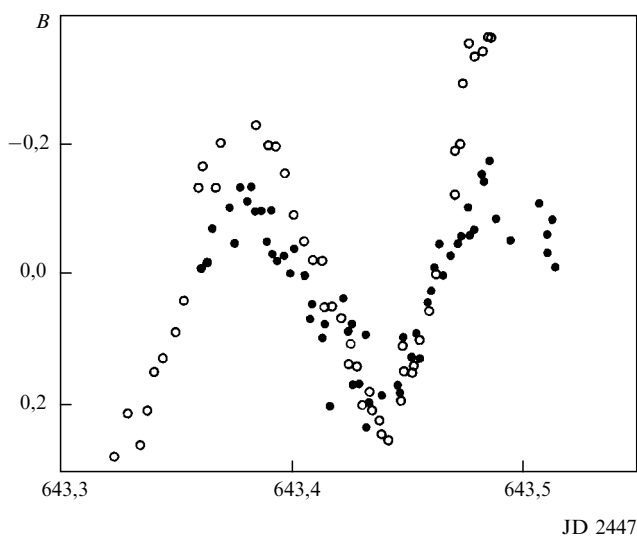


Рис. 6. Кривые блеска астероида 87 Сильвия (Sylvia), полученные 26 (светлые кружки) и 28 (черные кружки) апреля 1989 г. в Крымской астрофизической обсерватории [96]. Совмещение кривых по шкале времени сделано сдвигом наблюдений 28 апреля на целое число периодов. По оси абсцисс отложено время в юлианских днях, по оси ординат — относительные звездные величины

Таблица 1. Параметры двойных астероидов

Название	Диаметр, км	Размер спутника, км	Радиус орбиты спутника, км	Ссылка	Название	Диаметр, км	Размер спутника, км	Радиус орбиты спутника, км	Ссылка
2 Паллада (Pallas)	523	50	1000		243 Ида (Ida)	54 × 24 × 21	1,5	100	[1, 47]
6 Геба (Hebe)	192	20	—	[30]	423 Диотима (Diotima)	217	80	400	[115]
9 Метиды (Metis)	153	60	1100	[20]	433 Эрос (Eros)	35 × 16 × 7	20	60	[45, 76, 77]
18 Мельпомена (Melpomene)	135	48	750	[54]	532 Геркулина (Herculina)	230	46	1000	[54]
44 Низа (Nisa)	80	т. п.	конт.	[54]	624 Гектор (Hektor)	234	т. п.	конт.	[51, 54]
49 Палес (Pales)	140	50	450	[54]	1220 Крокус (Crocus)	24 × 22 × 12	12	50	[94]
87 Сильвия (Sylvia)	271	150	250	[96]	1580 Бетулия (Betulia)	6 × 8	т. п.	конт.	[54]
146 Луциния (Lucina)	137	6	1600	[55]	4179 Тютатис (Toutatis)	2,5	т. п.	конт.	[91]
171 Офелия (Ophelia)	90	30	300	[54]	4769 Касталия (Castalia)	1,7 × 1	т. п.	конт.	[33, 37]
216 Клеопатра (Kleopatra)	145	т. п.	конт.	[35]					

Земли и позволяет определить число граней на их поверхностях [95]. Отметим, что для исследования периодичностей полезно использовать не только кривые блеска астероидов, полученные в одной из фотометрических полос, но и данные показателей цвета, несущих информацию о колебаниях цвета с периодами вращения компонентов астероида [96].

3.3.4. Популяция астероидов со спутниками. Сформулированные нами признаки мультикомпонентности астероидов, с одной стороны, и большое количество наблюдательных свидетельств существования двойных астероидов и астероидов со спутниками, с другой, позволяет нам коснуться вопроса популяции сложных по структуре астероидов. В табл. 1 приведены данные о тех астероидах, для которых тем или иным методом получен ряд параметров двойной системы. В качестве размера астероида в большинстве случаев приведен диаметр, взятый из каталога [97], а в некоторых случаях размеры из оригинальных статей. Для тесных пар (т. п.) размер спутника близок к размеру астероида. Для контактных систем (конт.) радиус орбиты спутника равен сумме радиусов компонентов. Более полный список астероидов, заподозренных в двойственности, приведен в работе [5]. Он содержит 51 название и, по-видимому, почти полностью охватывает известных представителей этой популяции.

Любопытно отметить, что из пяти сотен хорошо исследованных разными методами, в том числе фотометрическим, астероидов этот список составляет примерно 10 %. Примерно такое же количество, 8 из 69, двойных астероидов, дала радиолокация (см. раздел 3.1.5). Из 28 крупных кратеров на Земле три являются двойными [64]. Чепмен и др. в 1980 г. [98] писали, что по их оценкам среди крупных астероидов двойные составляют 10 %. Таким образом, целенаправленные наблюдения и дальнейшее изучение двойных астероидов как достаточно многочисленной популяции малых тел может быть успешным. Однако нужно помнить, что успех наблюдений будет определяться не только удачным выбором объекта, но и условиями его видимости, т.е. тем, как будет расположена плоскость орбиты спутника астероида по отношению к наблюдателю.

4. Определение периодов компонентов астероидов

Частотный анализ фотометрических наблюдений позволяет выявить скрытые на первый взгляд периодичности и получить информацию о периодах, обусловленных орбитальным и вращательным движением компонентов сложного по структуре астероида. Эта задача относится к классу обратных задач фотометрии, когда по временному ряду измерений блеска астероида путем применения специальных методов и приемов удастся получить некоторые характеристики исследуемого тела.

Фотометрические ряды наблюдений астероидов, пригодные для частотного анализа, должны содержать большое число измерений, плотно расположенных по шкале времени. Время наблюдений астероидов ограничено условиями их видимости: они обычно наблюдаются около оппозиции, когда расстояние до них минимально, а видимая яркость их максимальна. Вследствие движения астероида меняются фазовый угол, определяющий освещенную Солнцем часть диска, и угол между условным центральным меридианом астероида и направлением на наблюдателя. Длительность интервала наблюдений, обеспечивающая приблизительно неизменные условия видимости астероида, составляет около двух недель для астероидов главного пояса. При исследованиях астероидов, приближающихся к Земле, эти условия надо рассматривать индивидуально.

Особенностью фотометрических рядов, получаемых при астрофизических исследованиях, является их разрывность, обусловленная условиями видимости объекта в течение ночи, погодными условиями и возможностями получения наблюдательного времени на телескопе. Поэтому такие ряды содержат полезную информацию обычно лишь в течение малого промежутка времени. В астрофизике разработаны несколько методов, позволяющих достаточно уверенно проводить анализ таких рядов, имеющих большую скважность. Они подробно описаны в монографии В.Ю. Теребижа [99] и иллюстрированы многочисленными примерами. Многолетний опыт анализа таких рядов в астрофизике и прекрасные научные результаты показывают перспективность применения этих методов и для исследования сложной композиции астероидов.

4.1. Методика частотного анализа фотометрических данных

Современная аппаратура обеспечивает хорошую точность измерений и высокое временное разрешение. Надо максимально использовать эти свойства при наблюдениях астероидов. Для обеспечения этого целесообразно одновременно с астероидом регистрировать блеск соседних звезд для исключения колебаний атмосферной экстинкции в течение ночи. Желательно иметь фотометрическую калибровку всех наблюдений по искусственному фотометрическому стандарту [100], использовать метод абсолютной фотометрии и определять экстинкцию земной атмосферы для каждой ночи наблюдений.

Частотный анализ проводится по звездным величинам астероида, приведенным к единичному расстоянию от Солнца и от Земли и к нулевому фазовому углу освещения астероида Солнцем. Данные должны быть получены в одной и той же фотометрической системе. Спектральная полоса для таких исследований может быть выбрана любая. Предпочтительна та, которая обеспечивает высокий уровень отношения сигнала к шуму. Следует отметить, что интересные результаты могут быть получены при анализе показателей цвета астероида. Для этого надо использовать фотометрические наблюдения, полученные одновременно в двух или более спектральных полосах. Отношение яркости астероида в двух полосах и изменение его со временем несет информацию о распределении цветовых пятен на поверхности астероида или его отдельного компонента. Анализ цветовых наблюдений дает возможность выделить период орбитального движения компонентов, так как цветовые пятна на поверхностях компонентов дают периоды вращения компонентов и не показывают периода орбитального. Так было в случае астероида 87 Сильвия (рис. 7). Периодограмма, построенная по блеску астероида, показывает четкий минимум на частоте, соответствующей периоду $0,215985^d$, а показатели цвета $V-R$ и $B-V$ на этой же частоте никаких периодических изменений не имеют. Цветовые изменения дали два периода, которые интерпретированы как периоды вращения компонентов [96].

Поиск периодов колебаний блеска переменных звезд производится в астрономии уже более ста лет. В основу его положен принцип построения пробных фазовых диаграмм (кривых блеска) с предполагаемыми периодами и выбор из них кривой с минимальным рассеянием точек. Развитие вычислительной техники позволило полностью перенести задачи поиска периодов на компьютер. Можно выделить два подхода при составлении многочисленных программ для поиска периодов. Один из них основан на опыте построения кривых блеска с пробными периодами и разработке автоматических приемов выделения наиболее вероятного периода по минимальному рассеянию точек вокруг средней кривой. Разные методы анализа отличаются методами оценки рассеяния точек, например метод Лафлера–Кинмана [101] и метод Юркевича [102]. Отметим, что форма кривой блеска при таком анализе может быть любой. Эти методы применимы для анализа рядов с большими разрывами, но для обеспечения высокой вероятности правильного выделения периода необходимо большое число данных наблюдений. Второй подход к составлению программ поиска

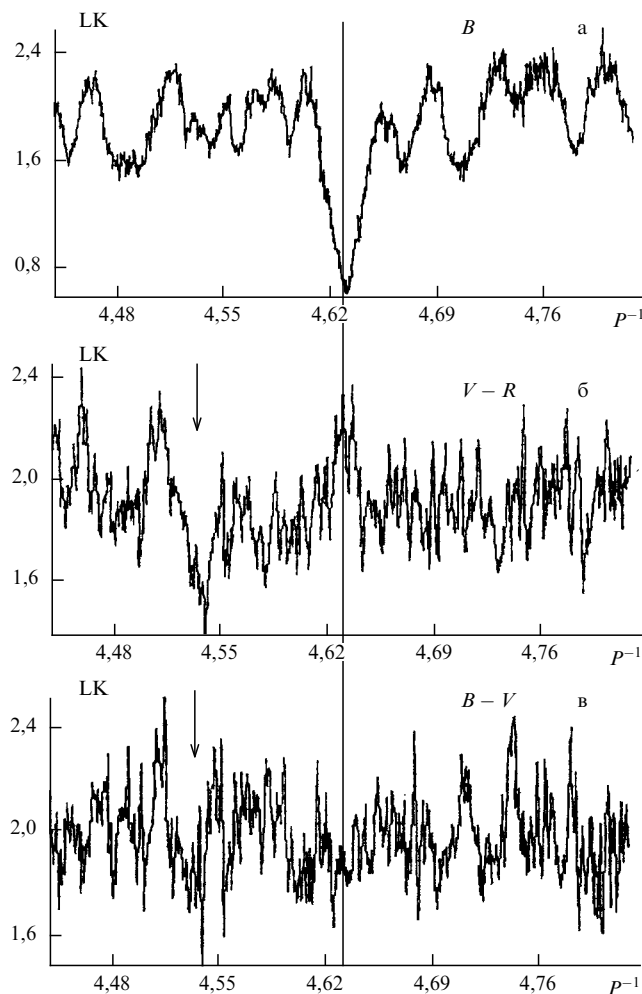


Рис. 7. Периодограммы, полученные методом Лафлера–Кинмана при частотном анализе блеска астероида в полосе B (а) и показателей цвета $V-R$ (б), $B-V$ (в). По оси абсцисс отложена частота в числе периодов в сутки, по оси ординат — параметр Лафлера–Кинмана LK

периодов основан на фурье-анализе. Он более строг математически, но встречает трудности при работе с разрывными рядами. Диминг в 1975 г. [103] опубликовал метод, позволяющий из получаемого спектра убирать частоты, модулируемые скважностью наблюдательного ряда. Этот метод предполагает синусоидальную форму колебаний и в случае астероидов, имеющих на кривых блеска по два максимума, не показывает колебаний с реальным периодом, а дает его вторую гармонику.

Исследования характеристик движения компонентов астероидов с помощью частотного анализа плотных фотометрических рядов были начаты В.В. Прокофьевой [87–89] в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). Ниже представлены результаты исследования трех астероидов. Два из них, 87 Сильвия и 423 Диотима (Diotima), являются крупными астероидами, для которых вероятность столкновений и, как следствие их, разрушений выше, чем для более мелких астероидов [104, 105]. На основании этого можно было ожидать наличия их сложной структуры. Третий астероид 4179 Тютатис относится к семейству астероидов, сближающихся с Землей, и может быть провозглашен двойной системой [106]. Его двойственность была обна-

ружена радиолокационными средствами в начале декабря 1992 г. [38].

Наблюдения всех трех объектов были выполнены на цифровом телевизионном комплексе полуметрового менискового телескопа Крымской астрофизической обсерватории. Наборы светофильтров обеспечивали инструментальную фотометрическую систему, близкую к системе *BV* Джонсона–Моргана и *R* Джонсона [107]. В основу методики фотометрических измерений блеска астероидов положен принцип повышения надежности получаемых данных за счет одновременного использования двух методов классической фотометрии: дифференциального и фундаментального [108]. Дифференциальность измерений обеспечивалась одновременной регистрацией блеска астероида и одной из соседних с ним звезд. Применение искусственного фотометрического стандарта и постоянная регистрация его яркости обеспечили получение однородных фотометрических данных в инструментальной фотометрической системе. Регулярная калибровка этой системы позволила иметь надежные уравнения перехода к стандартной цветовой системе *BVR*. Для определения экстинкции земной атмосферы каждую ночь проводились наблюдения специально подобранных звезд-стандартов, расположенных вблизи траектории исследуемого астероида. Время экспозиции обычно составляло 1–3 минуты для ярких астероидов и доходило до 5–6 минут для астероида Тоутатис. Точность фотометрических измерений их блеска колебалась от одного до нескольких процентов в зависимости от их видимого блеска и погодных условий. Переход к стандартной фотометрической системе *BVR* вносил погрешности в абсолютные значения блеска астероида не более 3 %.

Анализ фотометрических данных астероида проводился с помощью пакетов программ, позволяющих вести поиск частот, соответствующих периодам изменения блеска. Программа *Period*, по которой, в основном, сделана обработка наблюдений, была разработана М.Ю. Клепиковым и доработана К.В. Прокофьевой. В ней одновременно производится счет по трем различным методам: Лафлера–Кинмана, Юркевича, Диминга [101–103]. Программа позволяет оперативно просматривать свертки данных с заданным периодом, а также подбирать степень полинома для аппроксимации медленных изменений яркости или кривой блеска. Вычитание значений полинома из соответствующих фотометрических данных удаляет колебания блеска с выбранным периодом, производя этим операцию отбеливания данных, которая необходима для дальнейшего поиска скрытых периодов [99]. При наличии мультипериодичности отбеливание данных, как правило, производилось в порядке уменьшения амплитуды периодических колебаний.

Явление усложнения частотного спектра блеска астрономических объектов при наличии рядов наблюдений с большими разрывами хорошо известно в астрофизике под названием подмены частот [99]. Частоты, получившиеся в результате взаимодействия истинной частоты колебаний блеска исследуемого объекта с частотами скважности наблюдений, вызванных разрывами наблюдательного ряда данных, получили название сопряженных. Иногда эти ложные частоты называют артефактами. Амплитуды пиков, соответствующих этим частотам, по величине сравнимы с пиками, соответствующими истинной частоте. В частотном спектре

наблюдаются также так называемые комбинационные частоты, возникающие при прохождении сигнала через нелинейную среду [109]. Они представляют собой сумму и разность основной частоты колебания сигнала от исследуемого объекта и частот, присущих среде. В анализе астрофизических данных роль среды может выполнять скважность анализируемого ряда. Она несет частоты, определяемые условиями получения наблюдательного материала — длиной ряда или его частей, суточными, месячными разрывами ряда и др. причинами. Отметим, что привлечение некоторой априорной информации, например наличие двух максимумов на кривых блеска астероидов, облегчает оценку истинности того или другого обнаруженного при частотном анализе периода.

Для выявления реальных колебаний блеска астероида была использована совокупность признаков. Обнаруженная частота считалась реальной, если:

- в спектре имелись ее гармоники и частоты кратных периодов, а также комбинационные частоты, расположенные симметрично относительно исследуемой;
- фазовые диаграммы (кривые блеска), построенные с исследуемым периодом, не имеют пробелов, вызванных скважностью наблюдений, и показывают наличие двух максимумов и двух минимумов примерно одинаковых амплитуд;
- фазы кривых блеска, построенных по различным рядам наблюдений, совпадают;
- периодограммы модели, полученной при замещении звездных величин в исследуемых рядах на случайные числа, не показывают особенностей в области частоты, принимаемой нами за истинную;
- пик, соответствующий частоте обнаруженного периода, присутствует на периодограммах, полученных различными методами.

4.2. Тесная двойная система 87 Сильвия

Амплитуда изменения блеска астероида 87 Сильвия переменна в диапазоне от 0,30 до 0,62^m [65]. Как показал анализ данных различных публикаций, наибольший разброс амплитуд наблюдается, когда направление на наблюдателя лежит близко к экваториальной плоскости астероида и могут проявляться затменные эффекты. Наблюдения в КрАО были получены именно в таких условиях. С 26 апреля по 11 мая 1989 г. в течение шести ночей были выполнены измерения блеска в спектральной полосе *B* и в течение четырех ночей одновременно в трех полосах *BVR* и в интегральном свете. Всего для частотного анализа было использовано около 240 измерений блеска в полосе *B* и по 130 измерений показателей цвета *B–V* и *V–R* и интегрального блеска. Поиск периодов проводился по разным рядам наблюдений, что повышало вероятность обнаружения истинных периодов.

Были обнаружены изменения абсолютного блеска *B* астероида [87], которые можно аппроксимировать синусоидой с периодом около 13,5^d (рис. 8). Поскольку должно быть два максимума и два минимума, полный период ~ 27^d. Точность его определения составляет несколько суток и для подтверждения его правильности был проведен частотный анализ опубликованных значений абсолютного блеска астероида, который дал две близкие величины периода: 29,1 или 32,1^d [110]. Было сделано предположение, что такие изменения блеска астероида с амплитудой в несколько десятых

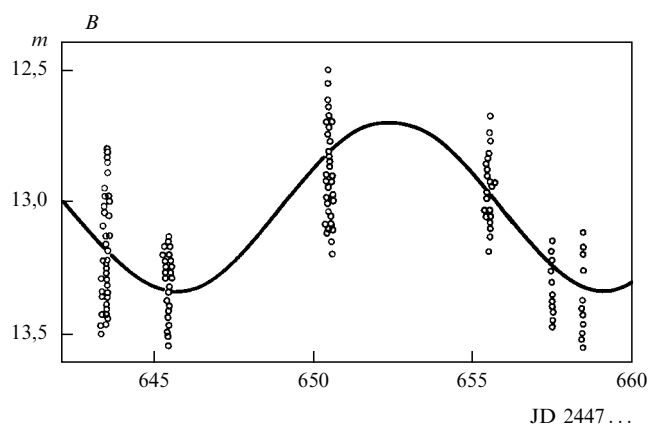


Рис. 8. Изменение абсолютного блеска B астероида 87 Сильвия (Sylvia) в зависимости от времени, выраженного в юлианских днях. Кривая — синусоида с периодом $13,5^d$

звездной величины могут быть объяснены наличием прецессии.

Вычитание синусоиды с периодом $13,5^d$ из данных наблюдений позволило удалить изменения блеска астероида от ночи к ночи. Анализ отбеленного массива данных четко показал наличие глубокого минимума на периодограмме, полученной по методу Лафлера–Кинмана, которая представлена на верхнем графике рис. 7. Частота минимума соответствует известному значению периода вращения астероида $0,215985^d$. Симметрично от основной частоты расположены по три минимума, отмеченных стрелками и соответствующих комбинационным частотам: сумме и разности основной частоты и частот периодов 27, 13,5 и $6,7^d$ и частот скважности ряда наблюдений. Свертка данных с найденным периодом приведена на рис. 9. Полином десятой степени достаточно хорошо представляет среднюю кривую блеска. Разброс отдельных данных наблюдений около кривой существенно превосходит погрешности наблюдений, что указывает на возможное существование других периодов и дает основание для дальнейшего частотного анализа. Перед его проведением была выполнена процедура отбеливания данных за частоту этого периода.

Частотный анализ дважды отбеленных данных показал, что совокупность признаков истинности периода выполняется для двух значений периодов, $0,221$ и $0,211^d$, соответствующих частотам $4,53d^{-1}$ и $4,74d^{-1}$, разность между которыми составляет около $0,2d^{-1}$, что соответствует периоду скважности в наблюдениях, равному 5^d . Периодограммы, полученные в окрестностях этих частот по двум рядам наблюдений, приведены на рис. 10а и рис. 10б. Вертикальными линиями отмечены положения новых частот, стрелками — положения комбинационных частот, расположенных симметрично около них и являющихся суммой и разностью частот этих колебаний с частотами периодов 27 и $13,5^d$. На рис. 10в для сравнения приведена периодограмма для модели, представляющей собой случайные числа, которыми заменены звездные величины при сохранении реальных моментов наблюдений. Только привлечение результатов частотного анализа показателей цвета астероида $B-V$ и $V-R$ (см. рис. 7) позволило выбрать из этих двух периодов первое значение, уточнив его: $0,2207^d$. Кривые блеска и показателя цвета $V-R$, построенные с этим периодом, приведены на рис. 11а и рис. 11б.

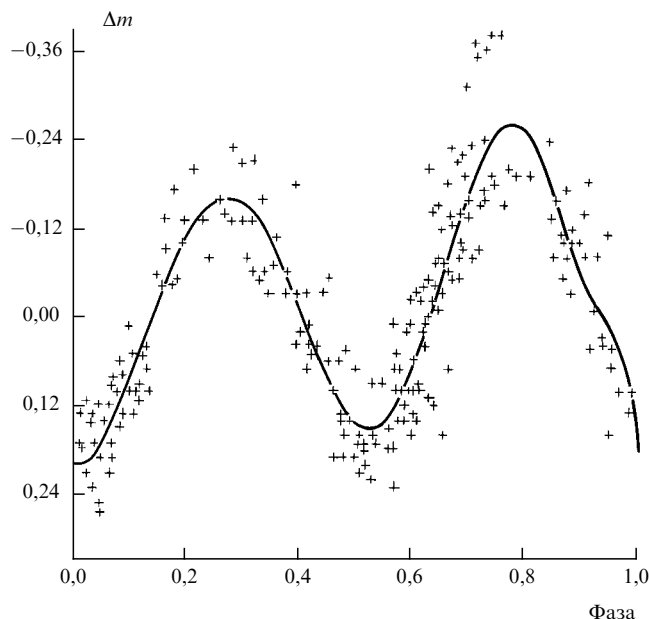


Рис. 9. Кривая блеска астероида 87 Сильвия, построенная с периодом $0,215985^d$ по B -наблюдениям после отбеливания их за частоту периода $13,5^d$. За нулевую фазу принят момент наблюдений 1989 апрель 26,324. Кривая — полином десятой степени. По оси абсцисс отложена фаза периода, по оси ординат — относительные звездные величины

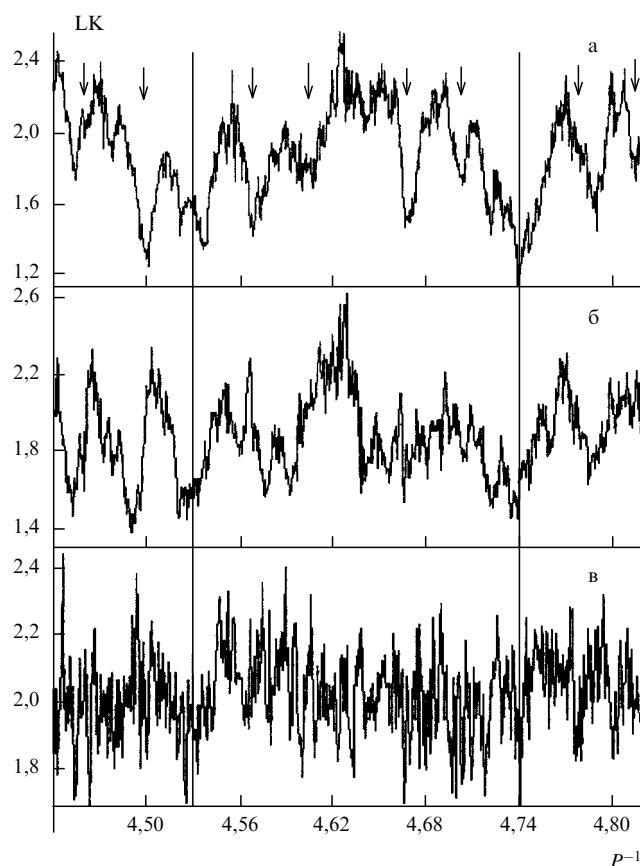


Рис. 10. Периодограммы, полученные методом Лафлера–Кинмана (см. рис. 7) по двум рядам (а) и (б) наблюдений астероида 87 Сильвия, полученным после их двойного отбеливания за частоты периодов $13,5^d$ и $0,215985^d$. Вертикальные линии показывают положения обнаруженных частот $4,53d^{-1}$ и $4,74d^{-1}$, стрелки — положения комбинационных частот. Результат анализа моделирования блеска астероида случайными числами представлен на третьем графике (в)

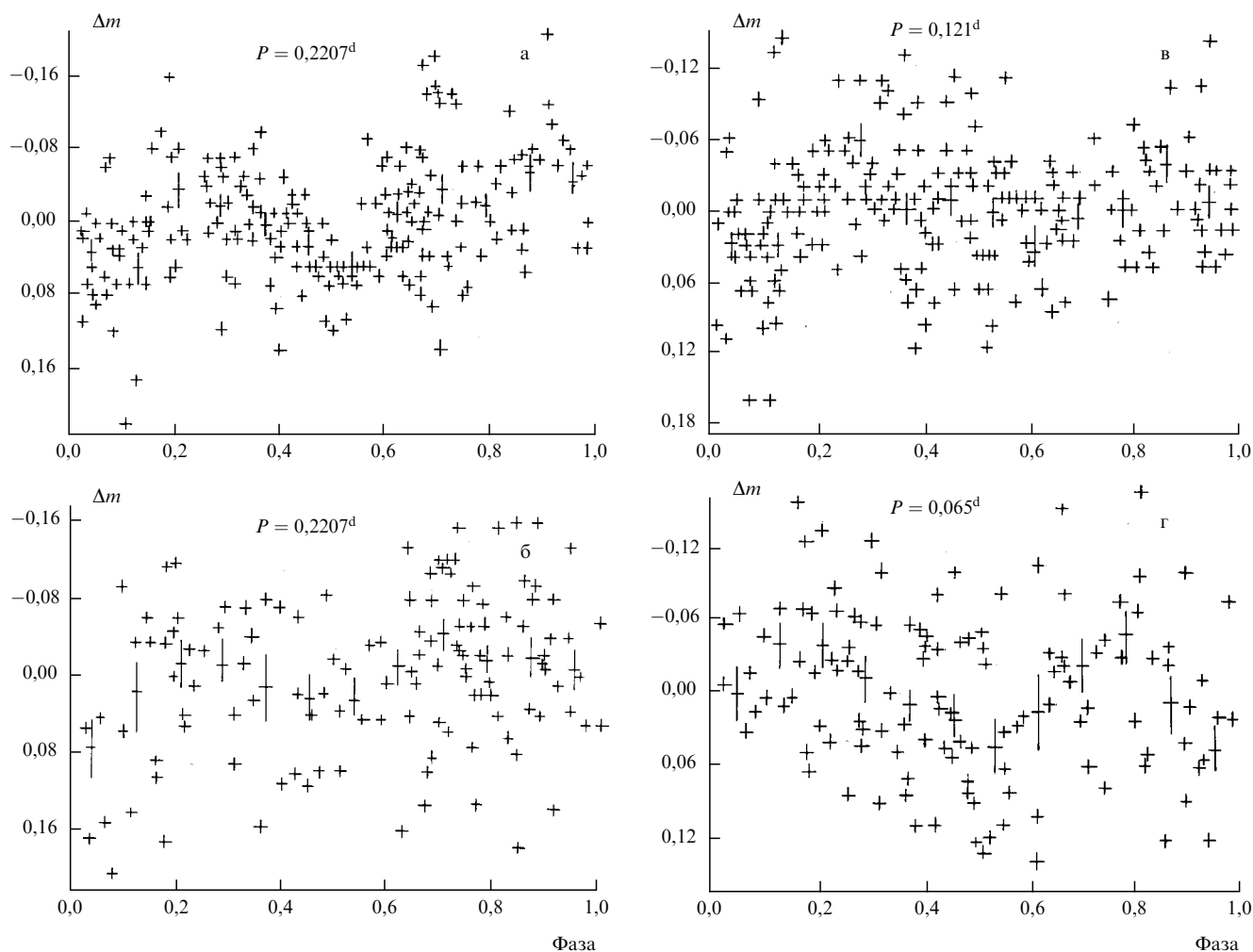


Рис. 11. Фазовые диаграммы, демонстрирующие вращение первого компонента астероида 87 Сильвия и построенные по его блеску в полосе B (а) и по показателю цвета $V-R$ (б) с периодом $0,2207^d$, а также вращение второго компонента, построенные по блеску B с периодом $0,1207^d$ (в) и по показателю цвета $B-V$ с периодом $0,065^d$ (г). Вертикальные черточки представляют средние по бинам значения и их погрешности

Анализ данных блеска астероида, полученных после тройного отбеливания фотометрических рядов, показал наличие периода $0,12^d$ (рис. 11в). Анализ цветовых наблюдений подтвердил наличие периодичности на высоких частотах. Наиболее четко она проявилась в колебаниях показателя цвета $B-V$. По аналогии с кривыми блеска, имеющими обычно два максимума, В.В. Прокофьева и М.И. Демчик [96] предположили, что на цветовой кривой может наблюдаться также два максимума. В этом случае период оказывается равным $0,065^d$ (рис. 11г). Этот период является в пределах точности второй гармоникой от периода $0,12^d$, найденного по колебаниям блеска. Отметим, что если на втором компоненте имеется четыре цветовых пятна, а не два, то результаты частотного анализа блеска и цвета близки.

Получив из частотного анализа свидетельства двойственности астероида, можно оценить некоторые его параметры, используя расчеты равновесных моделей двойных астероидов Г. Леоне и др. [84]. Считая, что максимальная амплитуда его переменности составляет $0,65^m$, получаем по известному периоду $0,215985^d$ оценку отношения масс компонентов $M_2/M_1 = 0,3-0,1$ и их средней плотности $4,5 \text{ г см}^{-3}$. Можно получить оценку отношения эффективных радиусов компонентов $R_2/R_1 = 0,7$, предполагая, что диски их круглые. Если

это верно, то разница блеска компонентов приблизительно равна $0,8^m$. Зная диаметр астероида, определенный в предположении, что это одно тело, и равный 271 км, получаем для эффективных диаметров компонентов значения $R_1 = 227 \text{ км}$ и $R_2 = 150 \text{ км}$. В предположении синхронности орбиты спутника можно оценить ее радиус как 250 км, при этом расстояние между поверхностями компонентов составляет всего около 60 км. Таким образом, астероид 87 Сильвия является тесной двойной системой.

4.3. Двойственность астероида 423 Диотима

Период вращения астероида 423 Диотима равный 4,622 часа, приведенный в каталоге [65], был найден по трем рядам наблюдений длительностью по 7, 5 и 6 часов. 10 августа 1981 г. наблюдения были получены в Чили [111] и показали два максимума и один минимум за 7 часов наблюдений. Амплитуда составила $0,06^m$, причем в максимумах блеск астероида различался на $0,02^m$. 10 ноября 1982 г. пятичасовой ряд показал два максимума и один минимум. Шобер отмечает, что расстояния между максимумами составили 2,5 часа в 1982 г. и 4,5 часа в 1981 г. Кроме этого в 1982 г. был зарегистрирован острый минимум глубиной $0,1^m$ и продолжительностью около часа, в то время как в 1981 г. форма кривой блеска

была близка к синусоидальной. На основании этих особенностей кривых блеска Шобер сделал предположение о наличии спутника. При наблюдениях, полученных в Италии 22 ноября 1982 г. в течение 6 часов, были зарегистрированы два максимума и два минимума [112]. Амплитуда была равна $0,18^m$. Две группы авторов пришли к выводу, что кривая блеска астероида нерегулярна, что затрудняет определение периода, для которого они все же дали величину 4,622 часа [113].

В Крымской астрофизической обсерватории в течение 7 ночей было получено 920 измерений блеска астероида 423 Диотима в фотометрической полосе V [90, 114]. Полная длительность регистрации блеска астероида составила 41,6 часа. При обработке наблюдений был предусмотрен дополнительный контроль правильности определения абсолютного блеска астероида. Для этой цели были проведены специальные наблюдения звезд, блеск которых регистрировался одновременно с блеском астероида.

Весь ряд наблюдений представлен на рис. 12. Амплитуда колебаний блеска астероида в течение каждой из ночей составляет $0,2-0,3^m$, а переменность на интервале в несколько суток значительно выше и просматривается ее регулярность. Аналогичные изменения блеска у астероида 1220 Крокус (Stocrus) были объяснены вынужденной прецессией, вызываемой спутником [94]. В.В. Прокофьева и др. [90] предположили, что изменения блеска астероида Диотима с амплитудой около $0,8^m$ могут свидетельствовать о существовании у него спутника.

Частотный анализ данных, полученных после вычитания медленных изменений блеска астероида из фотометрических данных с помощью полинома, позволил на высоком уровне значимости около 100 % найти период $0,621^d$ (рис. 13а, б). Кривая блеска, построенная с ним, приведена на рис. 14а. Она имеет два максимума различ-

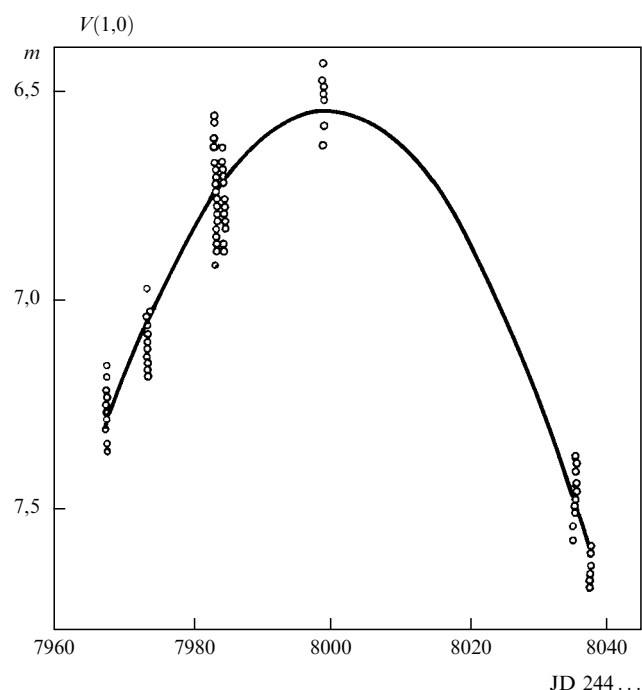


Рис. 12. Изменение абсолютного блеска $V(1,0)$ астероида 423 Диотима (Diotima) в зависимости от времени, выраженного в юлианских днях. Кривая — полином третьей степени

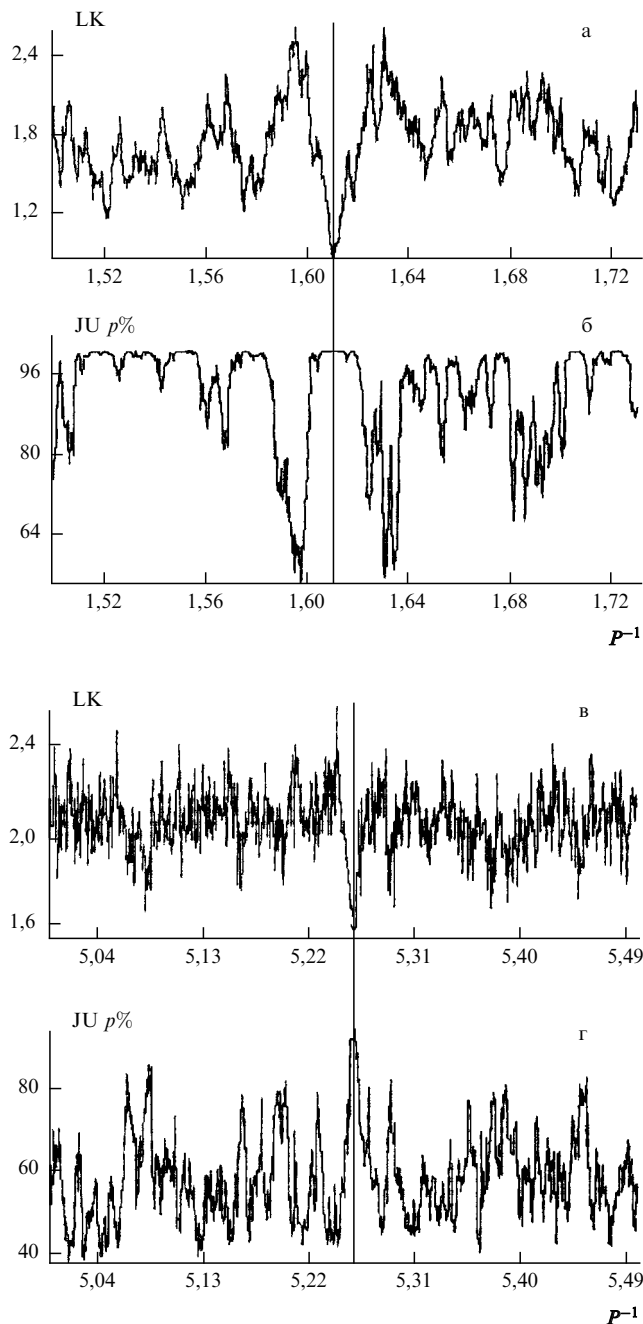


Рис. 13. Периодограммы, полученные методами Лафлера–Кинмана (а), (в) и Юркевича (б), (г) по однажды (а) и (б) и дважды отбеленным рядам наблюдений (в) и (г). Вертикальными линиями показаны найденные частоты, соответствующие периодам $0,621^d$ и $0,190^d$ суток. По оси абсцисс отложена частота, по осям ординат параметр Лафлера–Кинмана LK (а) и (в) и вероятность существования данной частоты $Yu p \%$

ной высоты, причем наибольший имеет острую форму. Максимальная амплитуда составляет около $0,2^m$, а разница блеска в максимумах около $0,09^m$. Отметим, что короткие ряды наблюдений, на основании которых ранее был определен период вращения астероида, не давали возможность обнаружить этот период.

Удаление колебаний с периодом $0,621^d$ из данных наблюдений было сделано вычитанием полинома (рис. 14а). Периодограммы, полученные методом Лафлера–Кинмана и Юркевича, приведены на рис. 13в и рис. 13г. Кривая блеска, построенная с периодом $0,190^d$,

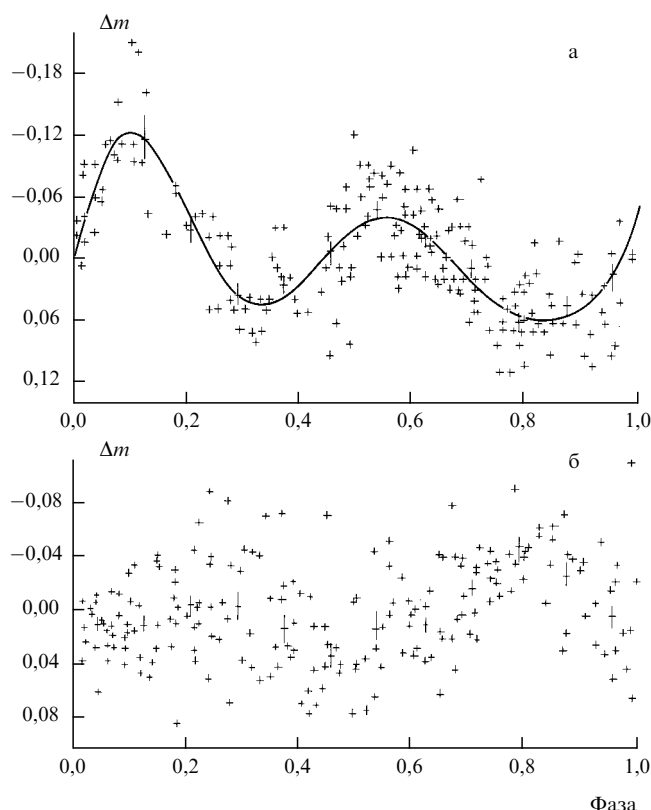


Рис. 14. Кривые блеска астероида 423 Диотима, построенные с периодами $0,621^d$ (а) и $0,190^d$ (б). Кривая — полином 6-й степени, точки с вертикальными черточками представляют средние по бинам значения блеска и их средние квадратичные погрешности

приведена на рис. 14б. Амплитуда изменений блеска составляет около $0,08^m$, величины максимумов отличаются на $0,04^m$.

Частотный анализ плотных рядов фотометрических наблюдений астероида 423 Диотима показал наличие трех колебаний блеска. Наиболее длинный период определен весьма грубо — он порядка 200^d . Его амплитуда около $0,8^m$ и плавный ход изменений блеска позволяют говорить о его реальности. Источником таких колебаний, по-видимому, является прецессия, вызванная наличием спутника. Два других периода, $0,621$ и $0,190^d$, согласно предположению В.В. Прокофьевой и Л.Г. Карачкиной [90, 114], являются периодами вращения компонентов астероида. Если орбита спутника синхронизована, то орбитальный период и период вращения одного из компонентов совпадают. При допущении, что орбитальный период равен $0,621^d$ суток, был найден радиус орбиты 400 км. Диаметры компонентов определяются из фотометрических данных как 200 и 80 км.

4.4. Двухкомпонентная структура астероида 4179 Тоутатис

Астероид 4179 Тоутатис относится к группе астероидов, испытывающих тесное сближение с Землей. В 1992–1993 гг. были проведены его всесторонние исследования во время приближения его к Земле на расстояние до 3,6 млн км. Радиолокационные наблюдения [38] показали, что он состоит из двух фрагментов. По фотометрическим и поляриметрическим наблюдениям Ю.Н. Круглый и др. [115] и С.В. Васильев и др. [116, 117] получили оценку его диаметра 2,5–2,7 км в предположе-

нии, что это одно тело. Фотометрические наблюдения Тоутатиса проводились во многих обсерваториях мира [118].

Предварительный частотный анализ блеска астероида Тоутатис был выполнен по наблюдениям, полученным в спектральной полосе V в Крымской астрофизической обсерватории [93]. Он был проведен в диапазоне периодов менее суток и показал наличие нескольких частот, что свидетельствовало о двойственности астероида. Более полный анализ в широком диапазоне частот был проведен по объединенным крымским и харьковским наблюдениям [91]. Все данные были приведены к единой фотометрической системе V , а также к единичным расстояниям от Земли и Солнца и к нулевому фазовому углу. Для повышения надежности результатов было проведено различное усреднение данных наблюдений и создано несколько рядов с различным временным разрешением. Каждый из них анализировался в оптимальном для него диапазоне частот. Перекрывание диапазонов обеспечивало дублирование получаемых результатов. Основной ряд состоял из 314 значений блеска, имеющих точность не хуже $0,01^m$ и имел временное разрешение 10–30 мин. Задача оказалась весьма сложной из-за обнаружения множества различных периодов. Проводилось многократное применение процедуры отбеливания данных за частоты обнаруженных периодов, причем удалялись колебания в порядке уменьшения их амплитуды. Анализ показал наличие большого количества гармоник. Однако удалось выделить основные периоды (рис. 15).

Период $7,48^d$ имеет амплитуду около $1,0^m$ и кривую блеска с двумя минимумами. Первый наблюдавшийся нами момент наиболее глубокого минимума $JD = 2448983,523^d$ отстоит на целое число периодов от момента, когда согласно радиолокационным данным [39] компоненты астероида находились на линии астероид–локатор, причем более крупный был ближе к наблюдателю. Это служит аргументом в пользу предположения, что период является орбитальным.

Период 62^d определен довольно грубо, так как он сравним с длиной ряда наблюдений. Сделано предположение, что он, по-видимому, вызван прецессией оси орбиты.

Периоды $2,85$ и $1,66^d$, по предположению В.В. Прокофьевой и др. [119], являются периодами вращения компонентов. Это согласуется с данными радиолокационных наблюдений о малых скоростях вращения астероида в целом и его компонентов в отдельности, полученными по малой ширине эхо-сигнала 2 Гц. Число гармоник 10 и 7 говорит о сложной структуре поверхностей компонентов астероида, на которой, по-видимому, имеется большое число изломов, пятен и других деталей. При вращении компонентов они создают высокочастотную модуляцию кривых блеска и обуславливают появление гармоник.

Анализ в области высоких частот позволил провести более тонкое исследование данных, сгруппированных по максимальному и минимальному блеску астероида, меняющемуся с периодом $7,48^d$. Это дало возможность выяснить принадлежность периодов конкретным компонентам. Авторы [119] предположили, что с периодом $2,85^d$ вращается более крупный компонент. Период $1,66^d$ имеет, по-видимому, второй, меньший по размеру, компонент, который, вероятно, частично или

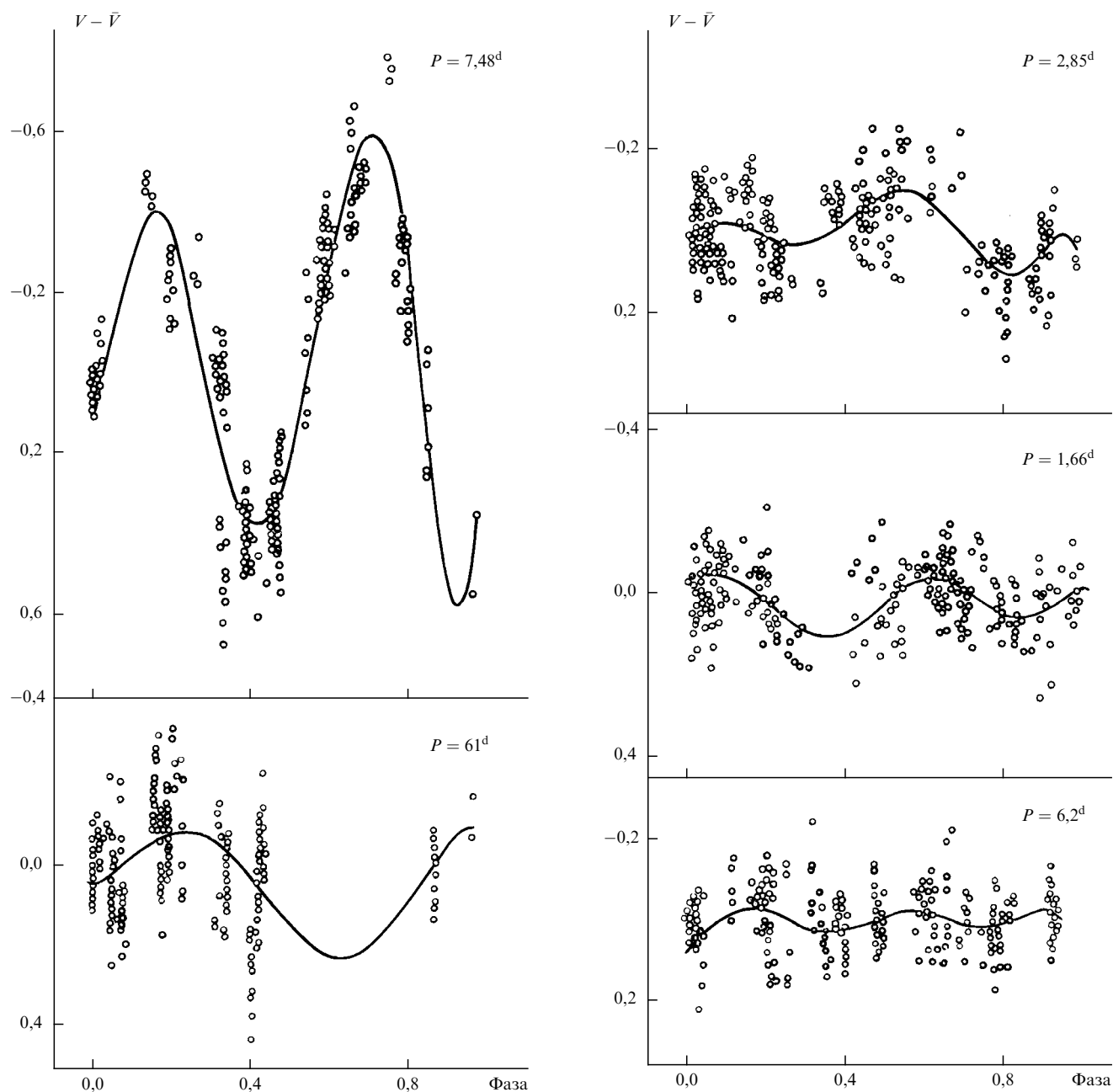


Рис. 15. Кривые блеска астероида 4179 Тютатис (Toutatis), построенные с найденными периодами, приведенными на графиках

полностью затеняется первым в наиболее глубоких минимумах.

Определение отношения периодов вращения компонентов P_1/P_2 и ширины эхо-сигналов для каждого компонента B_1/B_2 позволяют сделать оценку отношения их диаметров D_1/D_2 . Известно [44, 120], что

$$B = \frac{4\pi D \cos \delta}{\lambda P}, \quad (1)$$

где λ — длина волны локации, δ — астероидоцентрическое склонение локатора, которое можно считать одинаковым для обоих компонентов. Используя выражение (1), получаем отношение диаметров компонентов $D_1/D_2 = B_1 P_1 / B_2 P_2$. Отношение $B_1/B_2 = 0,64$ было найдено по радиолокационным изображениям асте-

роида, приведенным на рис. 3, с учетом того, что ближе к локатору расположен верхний компонент. Отношение периодов $P_1/P_2 = 1,71$ дает для отношения диаметров величину $D_1/D_2 = 1,1$. Это согласуется с оценками Зайцева и др. (1993 г.), по которым отношение площадей сечений компонентов 9 декабря 1992 г. было 0,85, и, следовательно, отношение $D_1/D_2 = 1,09$.

Частотный анализ колебаний блеска астероида Тютатис показал, что он, по-видимому, состоит из двух компонентов. Сопоставление оптических и радионаблюдений указывает на орбитальный период $7,48^d$. Период 62^d , возможно, вызван прецессией орбитального движения. Сделано предположение, что периоды вращения большего и меньшего компонентов составляют $2,85$ и $1,66^d$. Компоненты имеют угловатую форму, изломы и неоднородную поверхность.

5. Происхождение и динамика двойных астероидов и спутников астероидов

В данном разделе мы рассмотрим существующие модели происхождения спутниковых систем, изучим проблемы стабильности спутников астероидов и возможности их образования.

5.1. Космогонические модели:

возможная смена теоретической парадигмы

Какое место занимают астероиды в современной картине формирования Солнечной системы? Гипотеза Ольберса, открывшего астероиды Палладу и Весту, о том, что астероиды — осколки взорвавшейся планеты, в настоящее время отвергнута учеными. С точки зрения современной космогонии астероиды — это "строительный" материал для планеты, образование которой было прервано из-за возмущающего действия Юпитера. В результате этого воздействия характерные скорости соударения тел в поясе астероидов достигли 5 км с^{-1} , а скорости убегания с поверхности астероидов, по крайней мере, в 10 раз меньше: для самой крупной, Цереры, с диаметром 1003 км она составляет $0,5 \text{ км с}^{-1}$. Отметим, что обычно в зоне образования планеты хаотическая скорость тел примерно равна скорости убегания с крупнейшего тела зоны или зародыша планеты [121], что и позволяет планетезималиям объединяться при неупругих столкновениях.

В [121] указывается, что десятикратный "разогрев" пояса астероидов не только запрещает аккреционное слипание астероидов при взаимных соударениях, но и приводит к интенсивному столкновительному разрушению астероидов.

Итак, согласно общепринятым взглядам, в Солнечной системе есть девять "настоящих" планет, как правило, с развитыми спутниковыми системами и множество астероидов, которые являются всего лишь "битыми кирпичами" на месте несформировавшейся планеты и не могут претендовать на статус нормальных планет. Это подразумевает отсутствие у них спутников, обычно сопутствующих всем крупным планетам.

Открытие спутника Иды сразу ставит астероиды в один ряд с остальными планетами, по крайней мере, по наличию спутниковых систем. Поэтому вероятность существования спутников у астероидов нужно оценивать с точки зрения общей теории формирования спутниковых систем. К сожалению, такой теории еще нет, что затрудняет нашу задачу. С другой стороны, именно двойственность астероидов должна помочь разработке детальной теории образования спутников.

Проследим эволюцию моделей образования спутников. До 1978 г. считалось, что три из пяти планет земной группы — Меркурий, Венера и Плутон не имеют спутников (мы включили в земную группу Плутон из-за его небольших размеров). Вокруг Марса вращаются два очень маленьких спутника (отношение масс Фобоса и Деймоса к массе Марса около 10^{-8}). И только Земля, обладая весьма крупным спутником — Луной ($1/81$ массы планеты), выглядела явной аномалией.

Массы спутниковых систем Юпитера, Сатурна и Нептуна составляют 0,021–0,025 % от массы планеты, у Урана — всего 0,01 %. Можно было сделать вывод, что чем меньше планета, тем меньше масса (как абсолютная, так и относительная) ее спутников — за исключе-

нием системы Земля–Луна. Такая уникальность Луны вызвала к жизни гипотезу ее формирования из-за катастрофического события — касательного мегаимпакта [122, 123]: огромное тело, размером с Марс, ударяет Землю по касательной траектории, вырывает из нее кусок и улетает (куда? — неизвестно). Часть сорванного вещества образует массивный диск, из которого вырастает Луна.

Спутники планет-гигантов делятся на два класса: 1) регулярные спутники, расположенные вблизи плоскости экватора планеты на почти круговых орбитах; 2) нерегулярные спутники, с обратным (по отношению к собственному вращению планеты) обращением или просто большими эксцентриситетом и наклоном орбиты. Согласно модели Шмидта–Сафронова [121, 124–126], регулярные спутники сформировались из протоспутникового диска в результате слипания мелких частиц. Для нерегулярных спутников планет-гигантов обычно рассматривается иной механизм образования: захват "готового" крупного тела спутниковых размеров с гелиоцентрической орбиты [127–130]. Но эта гипотеза не может объяснить все разнообразие нерегулярных спутников каким-то одним механизмом захвата [131]. При этом большая масса Тритона с обратным движением по орбите делает его захват крайне маловероятным. Отметим гипотезу, согласно которой Плутон был ранее спутником Нептуна [132]. Фактически Плутон, вслед за астероидами, лишается при этом статуса "настоящей" планеты. Аккреционное формирование Луны рассмотрела Е.Л. Рускол [125]. В [133] утверждается, что аккреционные модели не могут объяснить происхождение столь массивного спутника как Луна.

Таким образом, к концу 70-х годов одновременно мирно сосуществовали уже три теории происхождения спутников: для регулярных спутников — аккреционная модель; для нерегулярных спутников — модель захвата; для Луны — модель мегаимпакта. По аккреционной модели формирование спутников представляет собой закономерный процесс, и характеристики спутников отражают свойства протоспутникового диска. Модели захвата и мегаимпакта основаны на учете случайных и маловероятных событий. Последние модели обладают большим количеством свободных параметров, что позволяет получить любую желаемую картину. Катастрофа — это панацея, позволяющая решить все космогонические проблемы "силовым" методом. При этом динамические особенности спутниковых систем возникают в результате игры случая и не зависят от условий образования. По царству "катастрофизма" серьезный удар был нанесен в 1978 г., когда Дж. Кристи открыл Харон, огромный спутник Плутона с массой около 15 % от массы планеты. Это не позволяет более считать Плутон бывшим спутником Нептуна: даже если представить себе двойной спутник, как его оторвать, не разрушив? Плутон подтвердил свой статус настоящей планеты, а гипотезу мегаимпакта, специализирующуюся на образовании массивных спутников, пришлось распространить и на крупный Харон. Это значительно снизило реальность такой модели. Проблемы возросли после появления многочисленных сообщений об открытии двойных астероидов. Для происхождения таких тел снова пришлось применять модель мегаимпакта, что ее окончательно обескровило. Сильный урон катастрофизму нанес "Галилей", который уже у второго исследо-

ванного им астероида обнаружил спутник. Очевидно, что астероидов со спутниками слишком много для модели маловероятных, тщательно рассчитанных касательных мегаимпактов. Означает ли это, что для спутников астероидов нужно создать еще один, четвертый класс космогонических моделей? Полагаем, что более перспективен метод создания единой модели для всех типов спутниковых систем. Ниже мы рассмотрим стабильность прямых и обратных спутниковых орбит, а потом сделаем набросок аккреционной модели, с единых позиций объясняющей формирование спутников как у главных планет, так и у астероидов.

5.2. Стабильность спутниковых орбит

Где могут и где не должны двигаться спутники планет? Традиционно сферой спутниковых движений считается сфера Хилла с радиусом, равным расстоянию до точки Лагранжа L_1 [134],

$$R_h = R \left(A - \frac{A^2}{3} - \frac{A^3}{9} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где $A = (m/3M)^{1/3}$, m — масса планеты, M — масса Солнца, R — радиус орбиты планеты. Но, во-первых, выяснилось, что стабильность зависит от направления обращения: обратные спутники устойчивее прямых [131, 135–139]. Орбиты прямых спутников (которые вращаются в направлении орбитального вращения планеты) теряют стабильность при приближении к границе сферы Хилла; обратные спутники могут существовать и за сферой Хилла. Правда, за границей сферы Хилла зона стабильности обратных спутников очень мала [131].

Изложим, следуя [131], результаты анализа движений спутниковых частиц с прямым и обратным обращением вокруг планеты или астероида в плоскости планетной орбиты и с учетом влияния Солнца (плоская ограниченная задача трех тел). Орбита планетного тела предполагается круговой, система координат вращается вместе с планетой. На рис. 16 изображены результаты расчетов для Юпитера. Граница $X = 0,06$, за которой практически исчезает область существования спутников, близка к сфере Хилла $R_h = 0,0667R$ (по формуле (2)).

Итак, согласно (2) и численным расчетам [131, 138, 139] любой астероид имеет вокруг себя зону, где он уверенно контролирует движение своих спутников и его гравитация доминирует над гравитацией Солнца. Оценим по формуле (2) максимальный радиус орбиты спутников для астероидов главного пояса и сближающихся с Землей:

$$R_h = 545R_a (R = 2,7 \text{ а.е.}) = 202R_a (R = 1,0 \text{ а.е.}), \quad (3)$$

где R_a — радиус астероида с плотностью $3,5 \text{ г см}^{-3}$.

Рассмотрим вопрос о характере спутниковых движений внутри сферы Хилла. В пространстве рис. 16 области стационарных орбит (не меняющихся во времени во вращающейся системе отсчета) выглядят как тонкие линии:

1. Круговые орбиты с прямым вращением (D), которые простираются до $0,4$ сферы Хилла. Эта величина меняется от $0,37R_h$ для Юпитера [131] до $0,42R_h$ для мелких астероидов [140].

2. Яйцевидные орбиты с прямым вращением, вытянутые от Солнца (N) или к Солнцу (S).

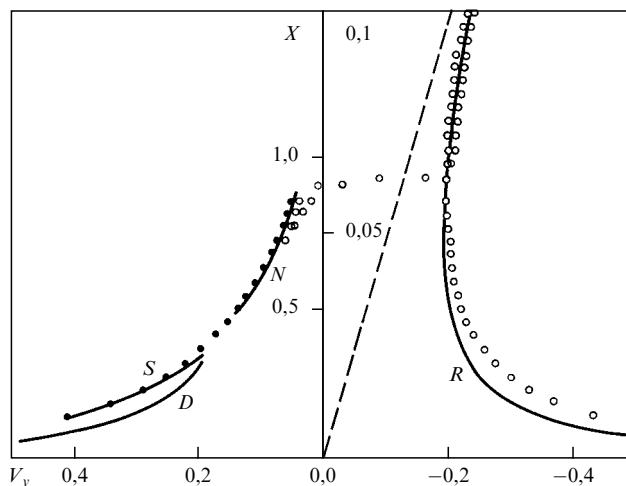


Рис. 16. Пространство начальных координат и скоростей пробных частиц — спутников Юпитера. Частицы располагаются по оси X — вдоль продолжения линии Солнце–Юпитер (числа справа — в расстояниях между Солнцем и Юпитером, слева — в радиусах сферы Хилла) и получают начальные скорости V_y , перпендикулярные оси X . Единица скорости — орбитальная скорость Юпитера. Сплошные линии отмечают четыре класса стационарных орбит — D , N , S , R . Точками обозначена граница стабильных орбит, при выходе за которую частица покидает Юпитер в течение 100 земных годов. Штриховая линия $V_y = -2X$ соответствует профилю скорости эпизиклических орбит в отсутствие планеты

3. Орбиты с обратным вращением (R), которые вблизи планеты отличаются от D -класса только направлением обращения и простираются далеко за сферу Хилла. При больших расстояниях от планеты R -орбиты превращаются в эпизиклические орбиты.

Таким образом, внутри сферы Хилла выделяется внутренняя зона с радиусом в $0,4$ сферы Хилла, где спутники с прямым обращением могут двигаться по круговым D -орбитам неограниченное время [131]. Во внешней зоне сферы Хилла прямые спутники двигаются из-за возмущающего действия Солнца по эллиптическим орбитам [131]. Образование спутников возможно только в "холодном" диске, где дисперсия скоростей частиц мала и соударения приводят к слипанию, а не к разрушению [141]. Очевидно, что протоспутниковый "холодный" диск может состоять только из прямых D -орбит или обратных R -орбит [131]. Следовательно, прямой протоспутниковый диск расположен внутри $0,4R_h$. Здесь же должны находиться и прямые спутники, не испытавшие значительного эволюционного изменения орбит.

В перицентре орбиты Юпитера внешний радиус диска, из которого образуются спутники с прямым движением, равен $18,5$ млн км [131]. Большие полуоси орбит внешних спутников Юпитера с прямым движением — 11 – 12 млн км, а с обратным движением — 21 – 24 млн км, т.е. последние располагаются сразу за предельной границей прямого диска. Это подтверждает ограничение радиуса диска с прямым движением и указывает на существование внешнего протоспутникового диска с обратным движением. Реальной границей внешнего диска с точки зрения стабильности является сфера Хилла. Стабильность частиц на R -орбитах за сферой Хилла незначительна.

Каждый, даже самый маленький, астероид имеет вокруг себя область стабильного спутникового движе-

Таблица 2. Спутниковые системы планет и астероидов

Планета	Радиус Хилла (% R)	Масса планеты (в M Земли)	Относительная масса спутников (в $10^{-4} M_{Pl}$)	Относительное расстояние до пика массы (в R_{Pl})	Число спутников
Юпитер	6,7	318	2	6,0 (Ио)	16
Сатурн	4,6	95	2	20,3 (Титан)	18
Нептун	2,6	17	2	15,9 (Тритон)	8
Уран	2,4	15	1	18,5 (Титания)	15
Земля	1,0	1	120	60,3 (Луна)	1
Марс	0,48	0,1	0,0002	2,8 (Фобос)	2
Плутон	0,13	0,002	1500	17,0 (Харон)	1
Церера	0,07	$3 \cdot 10^{-4}$	?	?	?
Сильвия	0,02	$6 \cdot 10^{-6}$	2000	2	1?
Геркулина	0,02	$4 \cdot 10^{-6}$	80	9	1?
Диотима	0,02	$3 \cdot 10^{-6}$	600	4	1?
Метида	0,009	$8 \cdot 10^{-7}$	800	14	1?
Ида	0,002	$7 \cdot 10^{-8}$	0,7	6	1
Тутатис	0,0002	$5 \cdot 10^{-12}$	7500	2?	1

ния. Как правило, спутники астероидов располагаются на расстоянии нескольких радиусов астероида (табл. 2). Даже для астероидов вблизи Земли граница сферы Хилла составляет не менее 200 радиусов тела, а радиус зоны круговых движений около 100 радиусов (см. (3)). Это означает, что ни солнечные, ни более слабые юпитерианские возмущения не могут дестабилизировать спутник астероида.

5.3. Аккреционная космогония протоспутникового диска

Протоспутниковые диски образуются в результате аккреции газовых масс и планетезималей с гелиоцентрических орбит. Свободное движение планетезимали к планете (термин "планета" относится и к астероидам) приводит к четырем вариантам:

1. Свободный пролет после однократного сближения с планетой (иногда после двух-трех оборотов вокруг нее).
2. Попадание в планету.
3. Столкновение с частицей спутникового диска.
4. Столкновение с соседней планетезималью.

После столкновения перед телами снова возникает выбор:

1. Уход на гелиоцентрическую орбиту.
2. Попадание на планету.
3. Переход на относительно стабильную спутниковую орбиту — прямую или обратную.

После перехода на спутниковую орбиту судьба тела решается во вторичных соударениях с другими спутниковыми частицами. В Солнечной системе мы имеем дело с тремя различными вариантами такой аккреционной задачи для

— планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Нептуна и Урана. Особенность этих систем: размер сферы Хилла составляет значительную долю от орбитального радиуса (см. табл. 2). Поэтому можно рассмотреть задачу о двумерной аккреции планетезималей с гелиоцентрических орбит на протоспутниковый диск. Для Юпитера, Сатурна и Нептуна планетезимали движутся примерно в плоскости протоспутникового диска. Ситуация сложнее для Урана, который лежит "на боку" и ориентация его спутниковой системы перпендикулярна плоскости эклиптики;

— планет "земной группы" Земли, Марса и Плутона. Для них сфера Хилла существенно меньше расстояния до Солнца, поэтому аккреционный рост протоспутникового

диска должен рассматриваться в трехмерной задаче (частицы падают на диск со всех сторон). Как для планет-гигантов, так и для планет этой группы хаотические скорости планетезималей сравнимы с первой космической скоростью с поверхности крупнейшего тела;

— крупных и мелких астероидов от Цереры до Тутатиса.

Это снова вариант трехмерной аккреции, но относительные размеры сферы Хилла еще меньше. Самым важным отличием от планет "земной группы" является то, что вследствие влияния Юпитера современные скорости пролета планетезималей возле астероида во много раз больше, чем скорость орбитального движения спутниковых частиц или первая космическая скорость убегания с поверхности астероида (как уже упоминалось, скорость взаимных столкновений тел в поясе астероидов 5 км с^{-1} , а первая космическая скорость для Цереры $0,5 \text{ км с}^{-1}$, для Тутатиса около 1 м с^{-1}). Это осложняет аккрецию и образование спутников в настоящее время.

5.4. Формирование спутниковых систем планет-гигантов

Разнообразие спутниковых систем планет-гигантов удивительно. "Вояджеры" открыли перед человечеством захватывающий мир спутников внешних планет: с мощными серными вулканами на оранжевой Ио, с многокилометровыми гейзерами жидкого азота на розоватом Тритоне, с Титаном, окутанным густыми облаками, скрывающими, возможно, углеводородный океан. Общее число спутников четырех планет-гигантов достигло 57.

При удалении от Юпитера мелкие внутренние спутники сменяются огромными галилеевскими лунами. За четвертым гигантом, Каллисто, простирается обширное пустое пространство от 1,9 до 11 млн км. В районе 11–12 млн км вокруг Юпитера движутся еще четыре крошечных спутника — группа Гималии, далее до 21 млн км снова пустота. И на самом краю юпитерианской системы обращаются 4 спутника группы Пасифе с большими полюсами орбит 21,2–23,7 млн км. Самое поразительное, что группа спутников Пасифе движется в обратном направлении.

Вне знаменитого кольца Сатурна расположен ряд мелких спутников, постепенно укрупняющихся с ростом радиуса орбиты. Среди спутников Сатурна самым боль-

Таблица 3. Характеристики моделей протоспутниковых дисков

Номер модели	Диски с прямым и обратным движением					Угол старта
	Количество					
	спутниковых орбит	треков планетезималей	точек пересечений орбит и треков	траекторий облаков обломков	компонентов	
Ю П И Т Е Р						
1	11 + 23	23 + 29	363 + 1037	1815 + 5185 = 7000	5	15*
2	27 + 35	88 + 92	4003 + 5569	20015 + 27845 = 47860	5	45*
3	27 + 44	789 + 306	48815 + 25468	439335 + 229219 = 668547	9	180**
С А Т У Р Н						
1	19 + 25	27 + 30	840 + 1200	4200 + 6000 = 10200	5	75*
2	19 + 25	497 + 139	21874 + 6613	196866 + 59517 = 256383	9	180**
Н Е П Т У Н						
1	18 + 20	455 + 509	8548 + 11860	76932 + 106740 = 183672	9	180**
Общее число: 1173662						
* Опубликовано в [131].						
** Опубликовано в [140].						

шим является Титан, расположенный на расстоянии 1,2 млн км. После Титана идут более мелкие Гиперион и Япет (последний на расстоянии 3,56 млн км). На краю системы Сатурна, в районе 13 млн км, нас снова ждет неожиданность в виде Фебы с обратным движением. Отметим, что масса Фебы более чем на порядок превосходит суммарную массу подобных спутников Юпитера.

Несомненно сходство между системами Юпитера и Сатурна — разнообразные группы спутников с прямым движением размещены в основном у планеты, а спутники с обратным движением располагаются на дальней периферии системы. Но система Нептуна сразу нарушает это наметившееся правило: ряд мелких спутников за внешней границей экзотической системы непунианских арок и колец заканчивается Протеем на расстоянии 118 тыс км, после чего следует огромный (радиус 1353 км) Тритон с обратным движением, удаленный от планеты всего на 355 тыс км. И, словно, для того чтобы окончательно запутать космогонистов, на самом большом удалении от Нептуна — на 5,5 млн км — размещается снова небольшой спутник с прямым движением — Нереида.

Компактная и весьма регулярная система 15 спутников Урана принципиально отличается от спутниковых систем других планет-гигантов вертикальной ориентацией плоскости орбитального вращения (Уран вместе со всей системой спутников "лежит на боку"). Направление орбитального обращения всех спутников Урана совпадает с направлением собственного вращения самой планеты.

Столь разительное несходство спутниковых систем четырех планет-гигантов на первый взгляд делает бессмысленными поиски общей теории образования этих систем. Тем более примечательным является построение модели, в которую укладывается образование всех основных групп спутников Юпитера, Сатурна и Нептуна [131, 140, 142].

Рассмотрим следующую задачу: возле планеты (астероида) уже существует начальный "затравочный"

протоспутниковый диск с прямым вращением. Вероятность столкновения планетезимали с частицей диска определяется оптической толщиной диска. В результате соударений поверхностная плотность и оптическая толщина диска меняются, что изменяет и вероятность захвата планетезималей. В численных расчетах этот процесс носит итерационный характер: после обстрела диска и изменения его плотности не более чем на 10–20 % от первоначальной вероятность взаимодействия планетезималей и частиц диска вычисляется снова и цикл повторяется. Такая задача решалась для Юпитера, Сатурна и Нептуна в случае [131, 140, 142]:

1. Планета с постоянной массой имеет круговую орбиту.

2. Начальный прямой диск моделируется набором D -орбит, а возникающие зоны обратного движения — набором R -орбит.

3. После соударения планетезимали и спутниковой частицы рассматривается движение центра масс обломков (для 5 или 9 соотношений масс планетезимали и частицы — от 0,1 до 1000).

В табл. 3 указаны характеристики рассчитанных моделей. Результаты расчетов траектории центров масс обломков:

1. Легкие и средние планетезимали, в 0,1 и 1 массы частицы диска, захватываются на спутниковые орбиты с прямым движением.

2. Тяжелые планетезимали, в 10 раз массивнее частиц диска, унося часть обломков (38 % всех траекторий обломков выходят на гелиоцентрические орбиты), в значительном количестве захватываются на орбиты с обратным движением: 25 % траекторий для Сатурна в модели 1; 15,4 % траекторий для Юпитера-2. На прямые орбиты таких планетезималей захватывается гораздо меньше: 7,1 % треков для Сатурна-1, 11,3 % для Юпитера-2.

3. Сверхтяжелые планетезимали (100 масс частицы диска): обратные захваты — 3,6 % для Сатурна-1, 5 % для Юпитера-2; прямые захваты — 0,1 % для Сатурна-1, 0,5 % для Юпитера-2. На орбиты с обратным движением

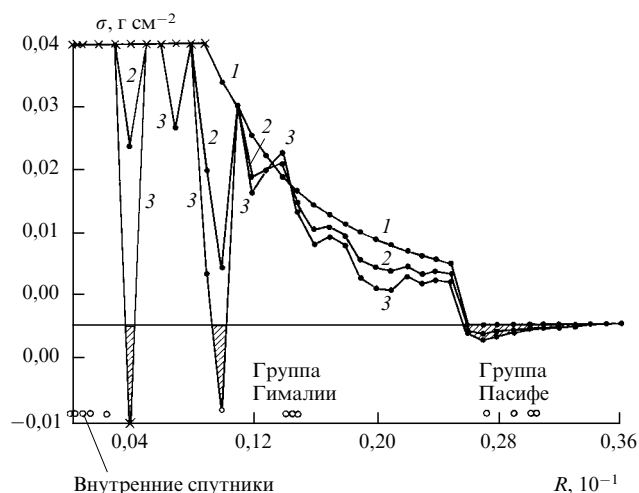


Рис. 17. Изменение поверхностной плотности прямого протоспутникового диска Юпитера (модель 3) в зависимости от радиуса R и времени T ($T = 0$ для кривой 1, $T = 0,5$ млн лет для кривой 2, $T = 0,7$ млн лет для кривой 3, шаг по времени 0,1 млн лет). Временная шкала иллюстративна и зависит от принимаемых параметров диска и среды планетезималей. Отрицательная плотность соответствует зоне с обратным движением (заштриховано). Кругами показаны спутники Юпитера. Быстрорастущий внутренний пик плотности выходит за пределы рисунка и соответствует массивным галилеевым спутникам. Группа спутников Гималии с прямым движением расположена рядом с единственной (во внешней зоне диска) областью роста плотности. Спутники группы Пасифе имеют обратное обращение. Две более простые модели (Юпитер-1, 2) дают близкие результаты

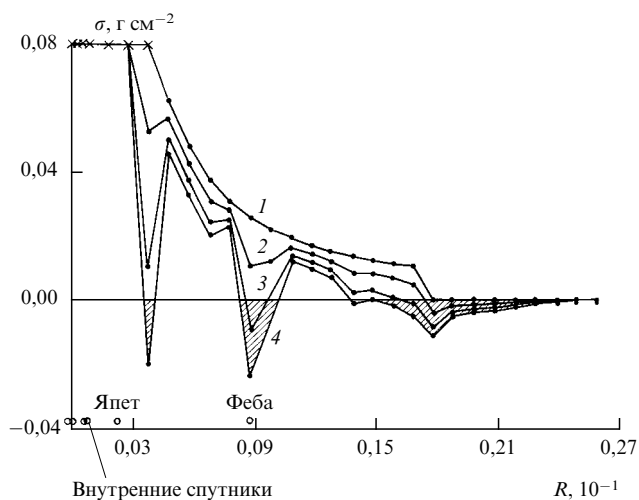


Рис. 18. Изменение поверхностной плотности прямого протоспутникового диска Сатурна (модель 2) в зависимости от радиуса R и времени T ($T = 0$ для кривой 1, $T = 1,35$ млн лет для кривой 2, $T = 2,25$ млн лет для кривой 3, $T = 2,7$ млн лет для кривой 4, шаг по времени 0,45 млн лет). Черными точками отмечены спутники Сатурна. Внутренний пик плотности соответствует внутренним спутникам и массивному Титану. Феба с обратным движением точно соответствует зоне накопления частиц с таким же движением

переходит даже часть супертяжелых планетезималей в 1000 масс частицы диска.

Небольшой процент захватов для тяжелых, в 10–100 масс частиц, планетезималей с учетом их значительной массы может оказаться определяющим для эволюции протоспутникового диска. В аккреционных моделях

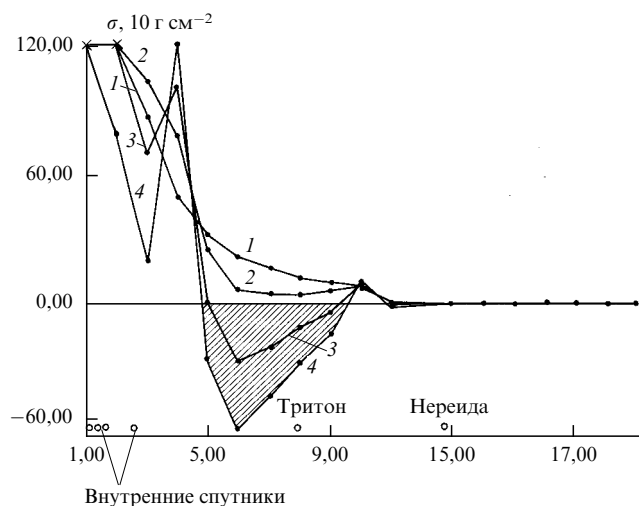


Рис. 19. Изменение поверхностной плотности протоспутникового диска Нептуна с прямым движением частиц ($T = 0$ для кривой 1, $T = 2$ млн лет для кривой 2, $T = 3$ млн лет для кривой 3, $T = 3,5$ млн лет для кривой 4; шаг по времени 0,5 млн лет). Огромный Тритон с обратным движением расположен в зоне накопления частиц с таким же движением

обычно предполагается, что эффективно захватываются тела с отношением масс, равным единице [126].

Для каждой из шести моделей был создан "массив судьбы" всех облаков обломков, по которому специальная программа вычисляет для разных начальных параметров диска изменение поверхностной плотности протоспутникового диска. Эти результаты для Юпитера (модель 3), Сатурна (модель 2) и Нептуна показаны на рис. 17–19. Расположение реальных групп спутников с прямым и обратным движением удивительно совпадает с профилем плотности, рассчитываемым в рамках довольно простой модели. При переходе от Юпитера к Сатурну и Нептуну изменялся только один существенный параметр модели — время эволюции, что легко связать с известным фактом медленного роста удаленных планет [126]. Видимо, современный облик спутниковых систем планет-гигантов сформировался в самой последней фазе роста планеты: между завершением интенсивной газовой аккреции и окончательным истощением резервуара твердых планетезималей. Фактически аккреционная модель вытесняет из планетной космогонии стохастические теории захватов спутников. Следующая задача: распространить аккреционную теорию на массивные спутники планет земной группы и спутники астероидов.

5.5. Рост спутников у планет земной группы

Вокруг Луны возникло сложное, иногда даже драматическое, переплетение космогонических теорий. Для аккреционного формирования спутников у планет "земной группы" детальных численных моделей пока не существует, поэтому оценим, базируясь на качественных соображениях, возможные изменения в сценарии образования спутников при переходе от планет-гигантов к планетам меньшей массы.

Время аккреционного образования спутника из диска при взаимном слипании частиц пропорционально времени обращения спутника [121], а следовательно, зависит от отношения радиуса орбиты спутника к радиусу

Таблица 4. Эффективность приливной эволюции для различных спутниковых систем

Наименование планеты	Относительная масса спутника (в M_{Pl})	Относительное расстояние до спутника (в R_{Pl})	Время изменения орбиты в 10^9 лет
2 Паллада	$9 \cdot 10^{-4}$	4	0,4
9 Метиды	0,06	5	3
18 Мельпомена	0,04	14	340
49 Палес	0,05	11	110
87 Сильвия	0,2	6	3
146 Луцина	$8 \cdot 10^{-5}$	2	$6 \cdot 10^{-5}$
171 Офелия	$8 \cdot 10^{-5}$	23	$7 \cdot 10^6$
	0,04	7	10
243 Ида	$1 \cdot 10^{-4}$	4	0,2
423 Диотима	0,05	6	$2 \cdot 10^4$
433 Эрос	1	4	$3 \cdot 10^{-2}$
532 Геркулина	0,008	7	14
1220 Крокус	0,3	5	40
		5	9

планеты. Из таблиц 2, 4 видно, что спутники астероидов, как правило, расположены ближе к центральному телу, чем спутники планет-гигантов и, значит, должны расти быстрее. По расстоянию спутника от планеты к аномальным системам относятся Земля и Плутон, спутники которых, видимо, испытали сильную приливную эволюцию и отодвинулись от планеты на значительное расстояние. Возможно, приливное воздействие значительно меняет орбиту у многих массивных спутников астероидов (см. раздел 5.7).

Вывод о быстром росте спутников возле малых планет и астероидов имеет чрезвычайно важное значение: спутник, сформировавшийся до прекращения роста протоспутникового диска, кардинально меняет весь процесс аккреции. До образования крупного спутника основная часть планетезимального вещества, захваченного в диск, выпадает на планету. Быстро выросший спутник будет поглощать значительную долю вещества диска. И чем массивнее этот спутник, тем активнее он поглощает окружающую массу вследствие увеличения сечения захвата. Кроме того, как показывают предварительные численные расчеты для системы Плутон–Харон (Горькавый, 1993, неопубликовано), массивный спутник на значительном расстоянии дестабилизирует внешние спутниковые орбиты и захватывает с них вещество, еще больше расширяя свою зону питания (так нетерпеливый ребенок трясет верхние ветки с яблоками). При поедании вещества диска, спутник может поглощать и угловой момент, если он перехватывает частицы около перигея их орбит, где скорость частиц превосходит орбитальную скорость спутника. Это предохраняет спутник от падения на планету. Кроме этого, массивные спутники планет "земной группы" могут отодвигаться от планеты благодаря приливному воздействию. Таким образом, в случае Земли–Луны мы имеем дело с новым типом аккреционного образования спутников, а именно с аккрецией на два тела, при которой вещество захваченных планетезималей перераспределяется между планетой и крупным спутником [121].

Относительные массы спутников небольших планет, благодаря механизму аккреции на два тела, могут значительно превосходить массы спутников планет-гигантов. Этот вывод о росте относительной массы спутника при уменьшении массы планеты означает, что

массивные Луна и Харон — это правило, а Марс и часть астероидов являются аномальными системами с мало-массивными спутниковыми системами из-за влияния Юпитера, который разогрел пояс астероидов и "обстрелял" Марс большим количеством планетезималей. Отметим, что планеты "земной группы", в том числе и астероиды, имеют чаще всего по одному спутнику, что подтверждает близость механизма образования их спутников.

5.6. Образование спутников астероидов

В космогонии спутников астероидов существует два главных вопроса: когда эти спутники успели образоваться и как они сумели уцелеть?

Видимо, спутники астероидов сформировались на протостадии — до разогрева пояса астероидов Юпитером. В очень уплотненном первичном поясе малых планет даже возле километровых астероидов могли возникать протоспутниковые диски и сами спутники. На этом этапе взаимные скорости тел в поясе астероидов были так малы, что образование спутников астероидов происходило по схеме аккреции на два тела, типичной для спутников планет земной группы. Следовательно, для астероидов должно быть характерно образование одиночного спутника, хотя возможно и существование нескольких спутников и даже кольца мелких тел. Феерическое зрелище мириадов минипланет с протоспутниковыми дисками, кольцами и спутниками резко отличается от традиционного представления об астероидах как о куче строительного мусора.

Непростой вопрос: как спутники астероидов уцелели до сих пор? Современные средние скорости относительного движения в поясе астероидов составляют 5 км с^{-1} , а первая космическая скорость на поверхности Иды равна 30 м с^{-1} , на поверхности Тоутатиса — около метра в секунду. Таким образом, каждая нынешняя встреча Иды или Тоутатиса (и их спутников) с другим астероидом может закончиться полным разрушением тела. Как показывают численные расчеты (см., например, [143]) при взаимном соударении астероида с налетающим на него телом по телу астероида проходит ударная волна, раздробляющая породы, а потом происходит разлет фрагментов астероида, связанных только слабой гравитацией.

В процессе разогрева пояса астероидов из-за влияния Юпитера процесс роста и самих астероидов, и их спутников остановился или резко замедлился. Часть астероидов потеряла спутники при взаимных гравитационных возмущениях и катастрофических столкновениях, у остальных произошла значительная эрозия как основного тела, так и спутника. Видимо, многие спутники астероидов из-за сильных соударений имеют значительный эксцентриситет и наклонение к экватору центрального тела. Тем не менее значительная доля астероидов могла избежать катастрофических соударений и сохранить свои спутники. С учетом разрушающих факторов можно считать 10 % реальной оценкой для нынешнего количества астероидов со спутниками. Вероятно, раньше их процент был гораздо больше: доля тел со спутниками уменьшилась не только за счет разрушения спутников, но и за счет появления популяции вторичных "бесспутниковых" астероидов, возникших при столкновительном разрушении первичных, более древних тел. Таким образом, наличие спутника

может являться признаком раннего образования астероида. Не исключено, что с разогревом астероидного пояса относительная масса вновь образующихся спутников постепенно уменьшалась, пока процесс спутникообразования не прекратился.

Оценить первичное количество астероидов со спутниками можно будет при установлении связи между периодом вращения астероида и наличием у него спутников. Роль протоспутникового диска в приобретении момента вращения центрального тела может быть очень велика [144], но этот вопрос исследован недостаточно и относится к одному из самых сложных в космогонии. Возможно, направление оси вращения планеты и ее угловой момент определяется наличием и ориентацией протоспутникового диска, который имеет (для основных планет) преимущественно две ориентации — близкую к плоскости эклиптики, как у большинства планет, или перпендикулярную (Уран и Плутон). Ориентация осей астероидов, может быть более случайной из-за малых масс и размеров сферы Хилла и последующих соударений. Не исключено, что ориентация протоспутникового диска астероидов задается на ранних стадиях образования диска и слабо меняется на протяжении процесса аккреции. Чрезвычайно интересна проблема существующего соотношения между ориентацией плоскостей орбит спутников и осей вращения астероидов. Если между вращением центральных тел и спутниками существует космогоническая связь, то можно ожидать преимущественно прямого (относительно собственного вращения астероида) обращения спутников астероидов.

5.7. Эволюция спутников астероидов

Основными факторами эволюции спутниковых систем после их окончательного формирования являются:

- приливное взаимодействие с планетой;
- изменение массы и углового момента вследствие обстрела внешними телами (метеоритами);
- торможение, связанное с солнечным излучением (эффект Пойнтинга–Робертсона);
- аэродинамическое торможение в верхней атмосфере планеты;
- резонансное гравитационное взаимодействие спутников.

Если мы будем рассматривать эволюцию отдельного спутника у астероида, который не обладает атмосферой, то нам остается рассмотреть эффективность только трех первых механизмов эволюции. Время жизни спутниковой частицы, определяемое эффектом Пойнтинга–Робертсона, пропорционально радиусу частицы и составляет в главном поясе астероидов примерно миллиард лет для спутника с радиусом 3 см. Рассмотрим эффективность изменения массы и углового момента спутников астероидов вследствие метеоритного обстрела. Отметим, что одним из самых важных отличий между спутниками планет и астероидов является величина скорости орбитального движения. Если первые движутся со скоростями в десятки километров в секунду, то спутники астероидов всего от одного до ста метров в секунду. Это означает, что спутник гораздо легче покинет астероид, чем планету. При этом обломки соударения могут легко покинуть сферу притяжения астероида и это приводит как к постоянному уменьшению массы как спутников, так и самих астероидов. Но даже не проводя никаких оценок можно сделать вывод, что этот меха-

низм, эффективность которого пропорциональна площади поверхности тела, не должен уничтожить все образовавшиеся спутники — ведь сами астероиды еще не исчезли из-за метеоритной эрозии.

Важным фактором является изменение углового момента спутника при его метеоритной бомбардировке. Отметим, что при изотропном обстреле спутник испытывает торможение и его орбита должна постоянно уменьшаться. Столкновение с крупными телами может как ускорить спутник (или его обломки) до полного его отрыва, так и затормозить его вплоть до соприкосновения с астероидом. Скорость изменения радиуса орбиты спутника из-за приливного воздействия планеты равна [145, 146]

$$r^{-1} \frac{dr}{dt} = 2\sqrt{3\pi G \rho} K_2 \sin(2\epsilon) \frac{m_s}{r^{13/2}}, \quad (4)$$

где m_s — масса спутника в массах планеты, r — радиус орбиты спутника в радиусах планеты, ϵ — угол отклонения приливного горба от направления на спутник. Для малых углов $\sin(2\epsilon) = Q^{-1}$, где Q — добротность планеты с плотностью ρ . Число Лява для однородной сферы [145, 146]

$$K_2 = \frac{3}{2} \left(1 + \frac{57\mu}{8\pi G \rho R_{pl}^2} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где μ — жесткость планеты с радиусом R_{pl} . Для астероидов первым слагаемым в скобках можно пренебречь. В табл. 4 приведены значения параметров известных спутниковых систем астероидов (из табл. 1 взяты те системы, у которых известны как размер спутника, так и радиус его орбиты) и вычисленные по формулам (4) и (5) характерные времена изменения орбиты спутников. Для всех тел были приняты следующие параметры: $\mu = 5 \cdot 10^{11}$ дин см⁻², $\rho = 3,5$ г см⁻³, $Q = 1000$ [145] (значение для Q очень приближенное, поэтому напомним, что время эволюции прямо пропорционально Q). Если период обращения спутника больше, чем время вращения астероида (подобно системе Земля–Луна), то приливной горб на астероиде, вызванный спутником, вследствие диссипативности опережает спутник и ускоряет его, переводя на более высокую орбиту. Если спутник вращается быстрее, чем сама планета (случай Марса–Фобоса), то он тормозится отстающим приливным выступом и падает на планету. Отодвигающиеся спутники постепенно замедляют свою эволюцию и, естественно, что рост орбиты таких спутников в современную эпоху должен быть очень медленным — с характерными временами, по крайней мере сравнимым с космогоническим. Тормозящиеся спутники, напротив, ускоряют свою эволюцию, и, если они до сих пор не упали на планету, то могут сделать это за достаточно короткие времена (как Фобос). Приливная эволюция орбит отсутствует в случае резонанса, если период орбитального вращения спутника равен периоду обращения планеты (случай Плутон–Харон). Из табл. 4 можно сделать вывод о том, что приливы могут играть важную роль в эволюции спутников астероидов. Отметим, что из 12 спутниковых систем табл. 4 только системы Сильвии и Диотимы демонстрируют быструю приливную эволюцию. Согласно разделу 4.3 данного обзора система Диотимы является синхронной, следовательно, время эволюции, полученное для формально

взятого (и для всех астероидов одинакового) угла отставания между приливным горбом и направлением на спутник, не имеет отношения к системе Диотимы. Время обращения спутника Сильвии и самого астероида, согласно разделу 4.2, отличается на 2 %. Это, с одной стороны, может означать синхронность, с другой, даже если это отличие реально, скорость вращения планеты относительно спутника так мала, что угол отклонения приливного горба должен быть очень маленьким (из-за зависимости диссипативной функции от частоты нагрузки). Это влечет за собой резкое замедление приливной эволюции спутника Сильвии. Время эволюции остальных спутников, которые, видимо, являются медленными и отодвигающимися, достаточно велико, что демонстрирует их современную стабильность. Большое число контактных систем астероидов может объясняться эффективным приливным торможением слишком близко образовавшихся к астероиду быстрообращающихся спутников.

6. Заключение

Предварительные оценки показывают, что до 10 % астероидов могут обладать спутниками. С учетом сложности астрофизических наблюдений большинства астероидов не кажется удивительным, что число случайно открытых двойных астероидов пока невелико. Приведенные в работе данные позволяют целенаправленно вести поиск двойных астероидов, принимая во внимание признаки двойственности. Возможность использовать частотный анализ дает новый метод изучения динамической структуры астероидов на базе широкораспространенных фотометрических наблюдений. Существование двойных планет (Земля, Плутон) и двойных астероидов нужно рассматривать как единую закономерность. Наличие у малых планет спутников также должно определяться общими для всех планет механизмами. Поэтому уточнение структуры и физической природы астероидов прольет свет на многие загадки эволюции и больших планет. Вопрос об исследовании астероидов имеет значение не только для нашей планетной системы. Открытие аккреционных дисков вокруг многих звезд повысило интерес к проблемам космогонии других планетных систем, решить которые невозможно без корректной теории образования Солнечной системы. Отметим, что молодые массивные планеты своим гравитационным полем разбрасывают часть астероидных тел, вызывая бомбардировку внутренних планет и самой звезды. После изучения переменности спектра звезды β Pictoris (уникальная фотография протопланетного диска вокруг нее получена в 1984 г. [147]) выяснилось, что там происходит подобная астероидно-кометная бомбардировка звезды с интенсивностью около 200 комет в год [148]. Исследование деталей этого интереснейшего процесса показывает, что оно вызвано существованием двух планет: внутренней типа Юпитера и внешней более молодой — типа Сатурна [149, 150]. Астероиды являются ключом к пониманию многих процессов формирования планетных систем. Хотя Юпитер значительно повлиял на эволюцию пояса астероидов, существование спутников последних является прямым следствием и свидетельством особенностей раннего этапа планетезимальной эволюции. Если верна гипотеза об образовании спутников малых планет на самой начальной стадии

формирования планетезималей, то моделирование условий возникновения спутников астероидов даст важнейшую информацию о характеристиках планетезимального диска, еще не подвергшегося влиянию Юпитера. Будущий сравнительный анализ спутниковых систем малых и крупных астероидов, размещенных в разных зонах пояса астероидов, даст представление о темпах и характере разогрева главного пояса. Накопление данных об астероидах сложной структуры приведет к кардинальному расширению эмпирической базы космогонических теорий и должно внести принципиальные изменения в модели формирования спутниковых систем, а также, возможно, и самих планет.

Один из авторов (Н.Н. Горькавый) благодарит Международный научный фонд за финансирование исследований, описанных в разделе 5 данной публикации (грант U1B000/U1B200).

Список литературы

1. Belton M, Carlson R *IAU Circ.* **5948** (1994)
2. L M *Nature* **368** 401 (1994)
3. Jewitt D C, Luu J X *Nature* **362** 730 (1993)
4. Luu J *Asteroids, Comets, Meteors* (Eds H Milani, M Di Martino, A Cellino) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1993) p. 31
5. Прокофьева В В, Тарашук В П *Астрон. вестник* **29** (2) 123 (1995)
6. Shoemaker E M, Williams J G, Helin E F, Wolfe R F *Asteroids* (Ed. T Gehrels) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1979) p. 253
7. Клумов Б А, Кондауров В И, Конюхов А В *УФН* **164** 617 (1994)
8. Тезисы докладов Международной конференции "Проблемы защиты Земли от столкновения с опасными космическими объектами", г. Снежинск (Челябинск-70), 26–30 сентября 1994 г. (РФЯЦ-ВНИИТФ, 1994) ч. I, 112; ч. II, 140
9. Симоненко А Н *Астероиды* (М.: Наука, 1985)
10. Binzel R P *Asteroids II* (Eds R P Binzel, T Gehrels, M S Matthews) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 3
11. Wetherill G W *Ibidem* p. 661
12. Цицин Ф А *Астрон. календарь. Ежегодник. Переменная часть* (М.: Наука, 1993) с. 207
13. Meech K, Belton M *IAU Circ.* **4770** (1989)
14. Eulchishoni M, Barucci M A *Ann. Geophys. Suppl.* **9** 383 (1993)
15. Tholen D J *Asteroids II* (Eds R P Binzel, T Gehrels, M S Matthews) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 1139
16. Tholen D J, Barucci M A *Asteroids II* (Eds R P Binzel, T Gehrels, M S Matthews) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 298
17. Tedesco E F, Matson D L, Veeder G J *Ibidem* p. 290
18. Gardie J C, Chapman C R, Tedesco E F *Ibidem* p. 316
19. Innes R T A *Monthly Not. RAS* (4) 209 (1926)
20. Sichao W et al. *Icarus* **46** 285 (1981)
21. Абраменко А Н, Агапов Е С, Анисимов В Ф и др. *Телевизионная астрономия* (Под ред. В Б Никонова) (М.: Наука, 1984) с. 179
22. Gehrels T, Drummond J, Levenson N *Icarus* **70** 257 (1987)
23. Laberie A *Astron. Astrophys.* **6** 85 (1970)
24. Gezari D Y, Laberie A, Stachnik R V *Astrophys. J. Letters* **173** L1 (1972)
25. Дудинов В Н, Цветкова В С, Ерохин В Н *Вестник Харьковского ун-та* 1981 Вып. 16. **223** 33 (1981)
26. Балага Ю Ю *Исследования звезд с высоким угловым разрешением методом цифровой спеклинтерферометрии*. Канд. диссерт. (Киев: ГАО АН Украины, 1985)
27. Балага Ю Ю, Балага И И *Письма в астрон. ж.* **11** 112 (1985)
28. Weidenschilling S J, Paolichi P, Zappala V *Asteroids II* (Eds R P Binzel et al.) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 643
29. Drummond J D, Hege E K *Ibidem* p. 171
30. Hege E K et al. *Bull. Amer. Astron. Soc.* **12** 662 (1980)
31. Drummond J D et al. *Icarus* **61** 132 (1985)
32. Drummond J D et al. *Icarus* **61** 232 (1985)
33. Ostro S J *Rev. Mod. Phys.* **65** (4) 1235 (1993)
34. Ostro S J, Connolly R, Belkora Z *Icarus* **73** 15 (1988)
35. Ostro S J *Asteroids II* (Eds R P Binzel et al.) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 192

36. Pattengill G H et al. *Icarus* **10** 432 (1969)
37. Ostro S J, Chandler J F *Science* **248** 1523 (1990)
38. Ostro S J et al. *Bull. Amer. Astron. Soc.* **25** 1126 (1993)
39. Зайцев А Л и др. *Радиотехника и электроника* (10) 1842 (1993)
40. *Planetary Report* **13** (2) 28 (1993)
41. Zaitsev A L *Asrtonomy Poster. Abstracts* (Ed. Hugo van Woerden) (Netherlands, Sliedrecht: Twin Press, 1994) p. 269
42. Зайцев А Л, Кривцов А П, Шубин В А *Физика Луны и планет. Абстр. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. ак. Н.П. Барабашова* (Харьков: Астр. общ. Харьковского ун-та, 1994) с. 142
43. Ostro S J, Campbell D B, Shapiro I I *Bull. Amer. Astron. Soc.* **18** 796 (1986)
44. Ostro S J et al. *Astron. J.* **99** 2012 (1990)
45. Ostro S J, Rosema K D, Jurgens R F *Icarus* **84** 334 (1990)
46. Beatty J K *Sky and Telescope* **83** 134 (1992)
47. Morrison D *Newspaper of XXII Gen. Assambley of IAU "Sideral Times"* The Hague (6) 1 (1994)
48. Millis R Z, Elliot J L *Asteroids* (Ed. T Gehrels) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1979) p. 98
49. Binzel R P, van Flandern T C *Science* **203** 903 (1978)
50. Dunham D W *Bull. Amer. Astron. Soc.* **9** 621 (1978)
51. Bowell E et al. *Bull. Amer. Astron. Soc.* **10** 594 (1978)
52. van Flandern T C, Tedesco E F, Binzel R P *Asteroids* (Ed. T Gehrels) (Tucson: Univ. of Arisona Press, 1979) p. 443
53. Mc Mahon J *Science News* **114** (3) 36 (1978); **114** (26) 440 (1978)
54. Hartmann W K *Asteroids* (Ed. T Gehrels) (Tucson: Univ. of Arisona Press, 1979) p. 466
55. Arlot J E et al. *Icarus* **61** 224 (1985)
56. Mc Fadden L-A *Asteroids, Comets, Meteors* (Eds H Milani, M Di Martino, A Cellino) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1993) p. 95
57. Weissman P R et al. *Asteroids II* (Eds R P Binzel et al.) (Tucson: The Univ. of Arizona Press, 1989) p. 880
58. Tedesco E et al. *Icarus* **35** 344 (1978)
59. Голубев В А *Проблемы космической физики* Вып. 10 (Киев: Наукова думка, 1975) с. 23
60. Всехсвятский С К *Физические характеристики комет* (М.: Физматгиз, 1958)
61. Woronov A *Icarus* **34** 76 (1978)
62. Woronov A *Icarus* **34** 324 (1978)
63. Hut P, Weissman P R *Bull. Amer. Asrtion. Soc.* **17** 690 (1985)
64. Melosh H J, Stansberry J A *Icarus* **94** 171 (1991)
65. Lagerkvist C-L, Harris A W, Zappala V *Asteroids II* (Eds R P Binzel et al.) (Tucson: Univ. of Arisona Press, 1989) p. 1162
66. Magnusson P, Lagerkvist C-I *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* **86** 45 (1990)
67. Magnusson P *Asteroids II* (Eds R P Binzel et al.) (Tucson: Univ. of Arisona Press, 1989) p. 1180
68. Binzel R P et al. *Ibidem* p. 416
69. Drummond J D et al. *Icarus* **76** 19 (1988)
70. Луишко Д Ф, Бельская И Н *Астрон. вестник* **16** 195 (1982)
71. Ostro S J, Connelly R *Icarus* **57** 443 (1984)
72. Куприянов В В *Моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с объектами сложной формы. Автореф. канд. дисс.* (Москва, 1993)
73. Куприянов В В *Наблюдения искусств. неб. тел* **87** 120 (1990)
74. Lagerkvist C-L et al. *Asteroid photometric catalogue. Third update* (Astronomiska obs. Uppsala, Sweden, 1993)
75. Blanko C et al. *J. of the Italian Astron. Soc.* **60** 195 (1989)
76. Andre C *Astron. Nachr.* **155** 27 (1901)
77. Zessewitsch W *The Observatory* **60** 289 (1938)
78. Beyer M *Astron. Nachr.* **281** 121 (1953)
79. Dunlap J L *Icarus* **28** 69 (1976)
80. Dunlap J L, Gehrels T *Astron. J.* **74** 796 (1969)
81. Cook A F *Physical Studies of Minor Planets* (Ed. T Gehrels) (NASA SP-267, Washington. D.C.: U.S. Government Printing Office)
82. Weidenschilling S J *Icarus* **44** 807 (1980)
83. Tedesco E F *Science* **203** 905 (1979)
84. Leone G et al. *Asrtion. Asrtophys.* **140** 265 (1984)
85. Cellino A et al. *Ibidem* **144** 355 (1985)
86. Harris A W *Bull. Amer. Astron. Soc.* **15** 823 (1983)
87. Прокофьева В В, Демчик М И *Астрон. цирк.* **1552** 27 (1992)
88. Прокофьева В В *Кометный циркуляр* No. 426 13 (1992)
89. Прокофьева В В *Изв. Крымской астрофиз. общ.* **90** (1995) (в печати)
90. Prokof'eva V V, Demchik M I, Karachkina L G *Astronomical and Astroph. Transactions* **5** 000 (1984)
91. Прокофьева В В, Тарашук В П, Круглый Ю Н *Письма в Астрон. ж.* **21** (1) 66 (1994)
92. Prokof'eva V V, Pavlenko E P, Tarashchuk V P, Karachkina L G *IAU working group on wide-field imaging Newsletter* **5** 41 (1994)
93. Prokof'eva V V, Tarashchuk V P, Karachkina L G et al. *Planetary Space Sci.* (1994)
94. Binzel R P *Icarus* **63** 99 (1985)
95. Hill K M *Astrophys. Space Sci.* **147/2** 359 (1988)
96. Прокофьева В В, Демчик М И *Письма в астрон. ж.* **20** 299 (1994)
97. Tedesco E F *Asteriods II* (Eds R P Binzel et al.) (Tucson: The Univ. of Arizona Press, 1989) p. 1090
98. Chapman C R, Davis D R, Weidenschilling S J *Bull. Amer. Astron. Soc.* **12** 662 (1980)
99. Теребиз В Ю *Анализ временных рядов в астрофизике* (М.: Наука, 1992)
100. Прокофьева В В, Бочков В В, Павленко Е П *Изв. Крымской астрофиз. общ.* **88** 110 (1993)
101. Laffer J, Kinman T D *Astroph. J. Suppl.* **11** 216 (1965)
102. Yurkevich I *Astrophys. Space Sci.* **13** 154 (1971)
103. Deeming T J *Ibidem* **36** 137 (1975)
104. Farinella P, Paolicchi P, Tedesco E F, Zappala V *Icarus* **46** 114 (1981)
105. Farinella P, Paolicchi P, Zappala V *Icarus* **52** 409 (1982)
106. Farinella P, Chauvineau B *Astron. Astrophys.* **279** 251 (1993)
107. Страйжис В *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Мокслас, 1977)
108. Прокофьева В В, Демчик М И, Карачкина Л Г, Павленко Е П *Астрономический вестник* **26** (5) 3 (1992)
109. Горелик Г С *Колебания и волны* (М.: Физматгиз, 1959)
110. Прокофьева В В, Демчик М И, Карачкина Л Г *Изв. Крымской астрофиз. общ.* **92** 000 (1995)
111. Schober H J *Astron. Astrophys.* **127** 301 (1983)
112. Di Martino M, Cacciatori S *Ibidem* **130** 206 (1984)
113. Zappala V, Di Martino M, Hanslmeier A, Schober H J *Ibidem* **147** 35 (1985)
114. Прокофьева В В, Карачкина Л Г *Физика Луны и планет. Абстр. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. ак. М П Барабашова* (Харьков: Астр. общ. Харьковского ун-та, 1994) с. 103
115. Круглый Ю Н, Величко Ф П, Калашников А В *Компл. конф. "Астероидная опасность-93"* Программа и тезисы (С.-Пб.: Ин-т теор. астр. РАН, 1993) с. 17
116. Васильев С В, Ефимов Ю С, Луишко Д Ф *Компл. конф. "Астероидная опасность-93"* Программа и тезисы (С.-Пб.: Ин-т теор. астр. РАН, 1993) с. 18
117. Vasiliev S V et al. *Icarus* **104** 283 (1994)
118. Spenser et al. *Icarus* **104** 287 (1994)
119. Прокофьева В В, Тарашук В П, Круглый Ю Н и др. *Физика Луны и планет. Абстр. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. ак. М П Барабашова* (Харьков: Астр. общ. Харьковского ун-та, 1994) с. 106
120. Зайцев А Л, Ржига О Н, Кривцов А П *Компл. конф. "Астероидная опасность-93"* Программа и тезисы (С.-Пб.: Ин-т теор. астр. РАН, 1993) с. 40
121. Сафронов В С *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* (М.: Наука, 1969)
122. Hartmann W K, Davis D *Icarus* **27** 553 (1975)
123. *Origin of the Moon* (Eds W K Hartmann, R J Phillips, G J Taylor) (Houston: Lunar Planet. Inst., 1986)
124. Шмидт О Ю *Происхождение Земли и планет* (М.: АН СССР, 1962)
125. Рускол Е Л *Происхождение Луны* (М.: Наука, 1975)
126. Витязев А В, Печерникова Г В, Сафронов В С *Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция* (М.: Наука, 1990)
127. Bailey J M *Astron. J.* **77** 177 (1972)
128. Heppenheimer T A *Icarus* **24** 172 (1975)
129. Поллак Д Б, Фанейл Ф, в сб. *Спутники Юпитера* Т. 3 (Под ред. Д Моррисона) (М.: Мир, 1986) с. 264
130. Бернс Дж, в сб. *Система Сатурна* (М.: Мир, 1990) с. 296
131. Горькавый Н Н *Письма в Астрон. ж.* **19** 1108 (1993)

132. Harrington R S, van Flandern T C *Icarus* **39** 131 (1979)
133. Печерникова Г В, в сб. *Планетная космогония и науки о Земле* (М.: Наука, 1989) с. 106
134. Абалакин В К, Аксенов Е П, Гребеников Е А, Рябов Ю А *Справочное руководство по небесной механике и астеродинамике* (М.: Наука, 1971)
135. Чеботарев Г А *Бюлл. Ин-та теор. астрон.* **9** 341 (1968)
136. Hunter R B *Mon. Not. RAS* **36** 245 (1967)
137. Henon M *Astron. Astrophys.* **9** 24 (1970)
138. Chauvineau B, Mignard F *Icarus* **83** 360 (1990)
139. Hamilton D R, Burns J A *Icarus* **92** 118 (1991)
140. Горькавый Н Н, Тайдакова Т А *Письма в Астрон. ж.* **21** 000 (1995)
141. Горькавый Н Н, Фридман А М *Физика планетных колец: Небесная механика сплошной среды* (М.: Наука, 1994)
142. Gor'kavyi N N, Taidakova T A *Vernadsky-Brown Microsymposium 20. The Int. Work. Meeting on Comparative Planetology* (Moscow: GEONI, 1994) p. 25
143. Nolan M C, Asphaud E, Greenberg R *Bull. Amer. Astron. Soc.* **24** 959 (1992)
144. Киладзе Р И *Современное вращение планет как результат развития околопланетных роев мелких частиц* (Тбилиси: Мецниереба, 1986)
145. Бернс Дж, в сб. *Спутники планет* (М.: Мир, 1980) с. 138
146. Пил С, в сб. *Спутники планет* (М.: Мир, 1980) с. 106
147. Smith B A, Terrile R A *Science* **226** 1421 (1984)
148. Lagrange-Henri A M, Vidal-Madjar A, Ferlet R *Astron. Astrophys.* **190** 127 (1988)
149. Gor'kavyi N N *Second Inter. Conf. Planetary systems. Formation, Evolution, and Detection* (Waikoloa, Hawaii, December 13–15, 1993)
150. Gor'kavyi N N, Taidakova T A *Proc. 10th IAP Astrophysics Meeting Circumstellar dust disks and planet formation* (Paris, 4–8 July Editions Frontiere's 1994) (in press)

SATELLITES OF ASTEROIDS

V.V. Prokof'eva

Crimean Astrophysical Observatory

334413 Nauchny, Crimea, Ukraine

Tel. (7-06554) 7-11 24

E-mail: prok@crao.crimea.ua

V.P. Tarashchuk

Astronomical Observatory of Kiev University

ul. Observatornaya 3, 252053 Kiev, Ukraine

Tel. (7-044) 216-19 94

E-mail: aoku@gluk.apc.org

N.N. Gor'kavyi

Crimean Astrophysical Observatory

334242 Simeiz, Crimea, Ukraine

Tel. (7-06547) 7-13 70

E-mail: gorkav@catpeak.crimea.ua

More than 6000 asteroids in the Solar System have been discovered and numbered, near 500 of them are investigated in details by different methods. This review contains observational evidence of fact that no less than 10 % from them may consist of two or more bodies. This fact was confirmed by the discovery of asteroid's Ida satellite by space craft "Galileo". All this facts changes the observational and theoretical paradigms. Space and ground observations of asteroids with the help of modern techniques may give new extensive data for creation of double asteroids model. The examination of asteroid satellites stability, origin and dynamics show that the sphere of stable motion of satellites riches to some hundreds of asteroid radius. The suggestion is offered that the origin of asteroid satellites may be explained within the range of general accretion model of the planet satellites origin. The validity of this suggestion is discussed in detail.

PACS numbers: 96.30. Ys

Bibliography — 150 references

Received 4 January 1995, revised 9 March 1995