

УДК 523.44

В. В. Прокофьева-Михайловская¹, Ю. В. Батраков², Л. Г. Карачкина¹

¹НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, пос. Научный

²Институт прикладной астрономии РАН,
191187 Россия, Санкт-Петербург, набережная Кутузова, 10

Популяция астероидов со спутниками в Солнечной системе

Решение фундаментальных проблем возникновения и эволюции Солнечной системы требует всестороннего исследования малых тел Солнечной системы. Последнее десятилетие ознаменовалось многочисленными открытиями спутников у астероидов. Их изучение дает: а) возможность уточнения масс астероидов, их плотностей и других физических характеристик; б) информацию для создания средств защиты Земли от столкновения с астероидом, а также для планирования и развития полетов к астероидам в целях их исследования и использования для нужд человечества. В обзоре изложены наблюдательные данные об известных спутниковых системах астероидов, описаны методы обнаружения и исследования их основных характеристик, возможные механизмы образования спутников у астероидов, устойчивость их движения.

ПОПУЛЯЦІЯ АСТЕРОЇДІВ ІЗ СУПУТНИКАМИ У СОНЯЧНІЙ СИСТЕМІ, Прокоф'єва-Михайловська В. В., Батраков Ю. В., Карачкіна Л. Г. — Рішення фундаментальних проблем виникнення та еволюції Сонячної системи вимагає всебічного дослідження малих тіл сонячної системи. Останнє десятиліття ознаменувалося численними відкриттями супутників у астероїдів. Їхнє вивчення дає: а) можливість уточнення мас астероїдів, їхньої густини та інших фізичних характеристик; б) інформацію для створення засобів захисту Землі від зіткнення з астероїдом, а також для планування і розвитку польотів до астероїдів з метою їхнього дослідження і використання для потреб людства. В огляді викладено спостережні дані про відомі супутникові системи астероїдів, описано методи виявлення та дослідження їхніх основних характеристик, можливі механізми утворення супутників у астероїдів, стійкість їхнього руху.

POPULATION OF ASTEROIDS WITH SATELLITES IN THE SOLAR SYSTEM, by Prokof'eva V. V., Batrakov Yu. V., Karachkina L. G. — The decision of fundamental problems of the origin and evolution of the solar system requires a comprehensive research of asteroids. The last decade is marked by numerous discoveries of satellites of asteroids. The investigation of these satellites gives: a) the possibility to determine masses, densities and other

physical characteristics of asteroids with higher precision; b) some information for development of means of protection of the Earth from collision with an asteroid and also for planning and progression of flights to asteroids with the purposes of their scientific research and use of their natural resources for needs of mankind. We give the observational data on the known satellite systems. The methods for detection and investigation of their basic characteristics, probable mechanisms of formation of satellites of asteroids, and stability of their movement are described.

ВВЕДЕНИЕ

В современной науке XXI века активно развивается направление междисциплинарных исследований основ мироздания. Новые подходы, основанные на изучении сложных самоорганизующихся систем, могут дать ключ к решению космогонических и космологических проблем. Современная космогоническая теория рассматривает Солнечную систему как сложный самоорганизующийся объект с иерархией подсистем, насыщенный источниками энергии и обладающий удивительным богатством коллективных процессов. Солнечная система является пространственной структурой, состоящей из множества тел; она подвергается постоянным гравитационным и иным воздействиям. Непрерывно происходит самоорганизация Солнечной системы.

Астероиды, или малые планеты, наряду со спутниками больших планет, кометами и метеоритными телами принадлежат к огромному классу малых тел Солнечной системы [40]. Многие спутники больших планет физически и по размерам неотличимы от астероидов. У некоторых астероидов наблюдается газовыделение как у комет, а многие кометы, покрывшись в процессе эволюции твердой корой, неотличимы по своим свойствам от астероидов. Метеорные потоки, состоящие из микрометеоритов и пыли, вторгающиеся в земную атмосферу, могут быть связаны как с кометами, так и с астероидами. Вырисовывается картина тесной физической связи всех малых тел Солнечной системы. Эти тела имеют сложную пространственную структуру, хранят в себе информацию о составе первичного вещества протопланетного облака и находятся в состоянии непрерывной динамической эволюции. Решение фундаментальных проблем возникновения и эволюции Солнечной системы требует всестороннего исследования малых тел Солнечной системы.

Последнее десятилетие прошлого века ознаменовалось многочисленными открытиями спутников у астероидов. Астероиды перестали быть уникальными одиночными телами. Они, как и планеты, имеют спутники. Уверенные сведения о двойственности получены примерно для полусотни объектов, хотя по самым осторожным оценкам таких систем может быть не менее 10 000.

Предположения о двойственной структуре ряда астероидов обсуждались в научной литературе неоднократно [29, 30]. Однако были нужны неопровержимые доказательства существования спутников у астероидов. В начале 90-х годов прошлого века наблюдательные сведения о наличии спутников астероидов были получены в Крымской астрофизической обсерватории, когда по данным анализа фотометрических и колориметрических наблюдений были определены периоды вращения компонентов двойного астероида 87 Сильвия [18, 22].

Парадигма же представления об астероидах как о монотелах пошатнулась лишь после сенсационного открытия спутника у астероида Ида, сделанного с борта космического аппарата «Галилей», который направлялся к Юпитеру, а по пути сделал фотографии двух астероидов. Около одного из них, 243 Ида, был сфотографирован небольшой спутник, которому впоследствии дали название Дактиль (рис. 1). Хотя спутник был зарегистрирован двумя независимыми экспериментами, полученные данные тщательно изу-

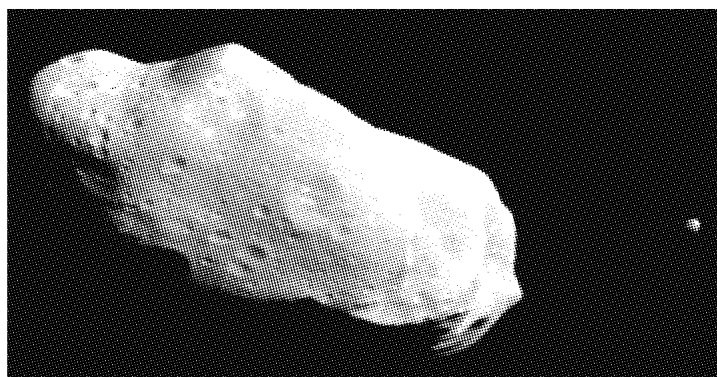


Рис. 1. Фотография астероида Ида со спутником Дактиль (светлая точка справа), полученная в 1993 г с борта космического аппарата «Галилео»

чались, и сообщение об открытии спутника у астероида было дано в печать лишь в 1994 г. [46].

Исследование двойных астероидов является одной из самых актуальных задач астрофизики Солнечной системы, дающей материал для космологии и космогонии. Это позволяют утверждать следующие положения.

Во-первых, исследование двойных астероидов дает возможность более точного решения задачи определения масс астероидов, их плотностей и других физических характеристик. Например, очень важным является факт, что двойные астероиды, сближающиеся с Землей, показали весьма низкую плотность 1.4—1.7 г/см³.

Второй аспект интереса к астероидам со спутниками связан с развитием космонавтики, поставившей целью совершить миссии к ряду комет и астероидов с целью их исследования и оценки перспективы использования их для нужд человечества.

Третьим аспектом повышенного интереса к астероидам является бурное развитие новой области науки по предотвращению астероидной опасности. С этой целью проводятся теоретические и модельные исследования, целью которых является создание средств защиты Земли от возможной опасности, которую создают отдельные астероиды из группы тел, сближающихся с Землей. Известно, что есть около 1000 объектов с абсолютной величиной $H < 18^m$ (размером не менее 1 км), которые имеют потенциальную возможность столкновения с Землей не реже одного раза за 0.5 млн лет. Возможно, некоторые крупномасштабные катастрофы в истории Земли были связаны с падениями крупных астероидов или комет.

Обсуждению новой ситуации, связанной с открытиями двойных астероидов, посвящен настоящий обзор. Мы намерены на основе публикаций, наблюдений и собственных исследований изложить наблюдательные данные об известных спутниковых системах у астероидов, показать пути и методы обнаружения и исследования этого класса объектов, описать разные модели образования спутников у астероидов.

ПОПУЛЯЦИИ АСТЕРОИДОВ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ОБ АСТЕРОИДАХ СО СПУТНИКАМИ

Астероиды находят на разных расстояниях от Солнца, вплоть до границы Солнечной системы. Количество занумерованных астероидов в июне 2005 г. составляло около 100 тысяч. Вместе с малыми планетами, имеющими только предварительные обозначения, элементы орбит которых пока не определены с достаточной точностью, их насчитывается более 200 тысяч.

Около 96 % всех известных астероидов движется по эллиптическим орбитам между орбитами Марса и Юпитера, оставаясь в пределах тора, называемого главным поясом астероидов (ГПА). Диапазоны больших полуосей a орбит астероидов ГПА находятся в интервале 2.1 а. е. $< a < 3.3$ а. е., средних суточных движений (средних движений), равных средней угловой скорости движения астероидов вокруг Солнца — в интервале $590'' < n < 1170''$. Около 3 % от общего количества астероидов относятся к астероидам, сближающимся с Землей (АСЗ).

Движущиеся во внешней части Солнечной системы по гелиоцентрическим орбитам объекты относятся к следующим динамическим группам:

1) классические объекты пояса Койпера. Их почти круговые орбиты лежат в области 40—50 а. е. от Солнца, а плоскости орбит наклонены к эклиптике менее чем на 40° ;

2) резонансные объекты пояса Койпера, или плутино. Большие полуоси их орбит близки к 39.5 а. е., их орбитальный период, как и у Плутона (248 лет), соотносится с орбитальным периодом Нептуна как 3:2;

3) объекты рассеянного диска (ОРД), имеющие весьма вытянутые орбиты ($e = 0.5—0.9$) с большой полуосью 60—100 а. е.

Таксономическая классификация астероидов проводится по спектрам и значениям альбедо. Есть радиальная стратификация астероидов по таким классам. Наиболее многочисленный класс С содержит астероиды с низкими значениями альбедо (около 6 %). Метеоритными аналогами их являются углистые хондриты. К классу S отнесены астероиды, обладающие свойствами каменистого вещества с небольшой примесью металлов. S-астероиды в среднем образовались ближе к Солнцу, чем С-астероиды.

Астероиды со спутниками в главном поясе астероидов. Орбиты большей части известных астероидов располагаются между орбитами Марса и Юпитера в ГПА, который имеет сложную пространственную структуру и находится в состоянии непрерывной динамической эволюции. Современный главный пояс астероидов сформировался в процессе различных воздействий со стороны Солнца и больших планет, столкновений малых тел между собой и с телами, проникавшими извне в Солнечную систему. Распределения размеров, орбитальных и вращательных характеристик, а также химических свойств объектов ГПА несут важную информацию о веществе протопланетного облака.

Для ГПА характерно неравномерное распределение астероидов по большой полуоси (или среднему движению). Есть четко выраженные минимумы (люки Кирквуда), связанные с некоторыми резонансами с большими планетами. Максимумы связаны с наличием кластеров — групп, кланов, семейств, устойчивых при определенных значениях больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит. Выделяют три зоны ГПА: внутреннюю ($a < 2.5$ а. е.), центральную (2.5 а. е. $< a < 3.28$ а. е.) и внешнюю ($a > 3.28$ а. е.).

Одной из характерных особенностей ГПА, имеющей значение для образования спутников астероидов, является наличие семейств. Динамические семейства, объединяющие группы астероидов с близкими собственными элементами, были впервые выделены К. Хирямой [78, 79]. Он отметил наличие сгущений в фазовом пространстве орбитальных элементов — больших полуосей a , эксцентриситетов e и наклонов орбит i для астероидов ГПА. Им были идентифицированы пять семейств: Эос, Фемиды, Корониды, Флоры и Марии. Вследствие лавинообразного увеличения количества астероидов с уверенно определенными орбитами списочный состав известных семейств сильно расширился. Этому способствовали работы Княжевича по определению собственных элементов астероидов [83, 84]. Семейства, согласно гипотезе Хирямы и по современным представлениям, — совокупность генетически связанных объектов, образовавшихся в результате разру-

Таблица 1. Спутниковые системы астероидов главного пояса, типа Венгрии и троянцев Юпитера

Номер и название (предварительное обозначение)	Динамический тип орбиты	Характеристики спутниковой системы					Литературный источник
		D_p , км	$\frac{D_s}{D_p}$	a , км	$P_{\text{орб}}$, сут	$P_{\text{перв.}}$, ч	
22 Kalliope	ГПА	181	0.2	1060	3.59	4.15	IAU Circ. N 8177, 2001 [89]
45 Eugenia	ГПА	215	0.06	1190	4.69	5.70	
87 Sylvia	ВПА	227	0.66	500	0.216	5.28	[22]
87 Sylvia	ВПА	261	0.06	1370	3.66	5.18	IAU Circ. N 7588, 2001; IAU Circ. N 7599, 2001
90 Antiope	ГПА	85	1.0	170	0.69	16.50	IAU Circ. N 7503, 2000
107 Camilla	ГПА	220	0.04	1000	3.0	4.84	IAU Circ. N 7599, 2001
121 Hermione	ВПА	209	0.09	795	1.63	5.55, 9.24	IAU Circ. N 7980, 2002
130 Elektra	ГПА	182	0.04	1170	4.0	5.22	IAU Circ. N 8183, 2003
243 Ida	ГПА	31	0.045	108	1.54	4.63	IAU Circ. N 5948, 1994
283 Emma	ГПА	148	0.08	370	1.12	6.89	IAU Circ. N 8165, 2003
379 Huenna	ГПА	92	0.08	1200	12	7.02	IAU Circ. N 8182, 2003
423 Diotima	ГПА	200	0.4	300— 400	0.62	4.56	[26]
617 Patroclus	Тр	105	0.9	610	3.41	>40	IAU Circ. N 7741, 2001
762 Pulcova	ГПА	137	0.15	810	4.0	5.84	[90]
854 Frostia	ГПА	15	—	50	1.57	—	IAU Circ. N 8265, 2004
1089 Tama	ГПА	13	0.7	20	0.68	16.44	IAU Circ. N 8265, 2004
1220 Crocus	ГПА	—	—	50	—	—	[48]
1313 Berna	ГПА	15	—	35	1.06	—	IAU Circ. N 8292, 2004
1509 Esclangona	Венгр	12	0.33	140	20	2.64	IAU Circ. N 8075, 2003
3749 Balam	ГПА	7	0.22	350	—	—	IAU Circ. N 7827, 2002
3782 Celle	ГПА	10	0.4	30	0.68	3.84	IAU Circ. N 8128, 2003
4492 Debussy	ГПА	10	—	25	1.11	—	IAU Circ. N 8354, 2004
4674 Pauling	ГПА	8	0.3	250	45	—	IAU Circ. N 8297, 2004
9069 Howland	ГПА	—	—	—	1.26	4.22	[116]
17246 2000 GL74	ГПА	4.5	—	230	95	—	IAU Circ. N 8293, 2004
22899 1999 TO14	ГПА	4.5	0.33	170	60	—	IAU Circ. N 8232, 2003

шения родительских тел, причем процесс разрушения мог происходить многократно.

В табл. 1 приведены данные об астероидах со спутниками во внутренней, средней и внешней частях главного пояса, сюда же включены данные об астероиде типа Венгрии 1509 Эсклангона и троянце Юпитера — 617 Патрокле. В первой графе указаны номера и названия астероидов. Если астероид не имеет постоянного номера, указано его предварительное обозначение. Во второй графе указаны динамические типы астероидов, зависящие от их орбитальных характеристик. Тип ВПА соответствует аналогу «outer belt» в англоязычной литературе. В последующих графах приводятся данные о параметрах спутниковых систем: диаметре D_p главного компонента, отношении D_s/D_p диаметров спутника и главного компонента, большой полуоси a орбиты спутника, а также о периодах $P_{\text{орб}}$ орбитального движения спутника и периоде $P_{\text{перв}}$ вращения главного компонента астероида. В последней графе приведены ссылки на открытия двойных астероидов.

Большинство астероидов, приведенных в табл. 1, имеют спутники диаметром в 5—20 раз меньше, чем диаметр главного компонента. Период обращения компонентов таких пар — порядка 4 сут, а расстояние между компонентами — порядка 4—10 диаметров главного компонента. Астероиды этой группы обладают достаточно крупными размерами, причем во внешней части ГПА астероиды существенно более крупные, что объясняется наблюдательной селекцией.

Астероиды 45 Евгения, 243 Ида, 1220 Крокус, 3749 Балам и 3782 Келле входят соответственно в известные семейства Евгении, Коронис, Эос, Флоры и Весты. Семейству Фемиды принадлежат два астероида — 90 Антиопа и 379 Гюэнна.

Отметим, что почти все двойные системы расположены в непосредственной близости от «острых» резонансов по среднему движению с Юпитером. Двойной астероид 1220 Крокус ($n = 680.55''$) находится между двумя резонансами: пятого порядка $9/4$ ($n = 672.89''$) и четвертого порядка $7/3$ ($n = 697.82''$). Спутниковая система Ида — Дактиль ($n = 732.12''$) находится рядом с резонансом третьего порядка $5/2$ ($n = 747.66''$). Двойной астероид 90 Антиопа ($n = 632.08''$) находится между двумя резонансами: седьмого порядка $13/6$ ($n = 647.97''$) с Юпитером и $1/3$ ($n = 628.85''$) с Марсом. Двойная система 423 Диотима ($n = 660.49''$) находится в непосредственной близости от резонанса шестого порядка $11/5$ ($n = 657.94''$). Спутниковая система 87 Сильвии ($n = 545.06''$) находится между близкими резонансами: четвертого порядка $9/5$ ($n = 538.31''$) и пятого порядка $11/6$ ($n = 548.28''$). Астероид 45 Евгения ($n = 790.74''$) находится в непосредственной близости от резонанса пятого порядка $8/3$ ($n = 797.50''$).

Спутниковые системы среди астероидов, сближающихся с Землей. Астероиды с перигелийными расстояниями $q < 1.3$ а. е. и расстояниями в афелии $Q > 0.983$ а.е. обычно называются АСЗ или ОСЗ — астероидами или объектами, сближающимися с Землей.

Принято выделять группы астероидов Атона ($a < 1.0$ а. е., $Q \geq 0.983$ а. е.); Аполлона ($a \geq 1.0$ а. е. и $q \leq 1.0167$ а. е.) и Амура (1.0167 а. е. $< q \leq 1.3$ а. е.). Орбиты астероидов групп Атона и Аполлона пересекают орбиту Земли, в то время как астероиды группы Амура пересекают только орбиту Марса, хотя довольно близко подходят к орбите Земли. Берлинская служба планетарных исследований аэрокосмического центра EARN (<http://earn.dlr.de/nea/>) ведет часто обновляемую базу данных о физических и динамических свойствах АСЗ. Источником АСЗ на 90 % можно назвать ГПА, так как согласно [16] а также [50] физические свойства объектов в этих популяциях практически совпадают. Считается, что практически все АСЗ образовались вследствие столкновительной эволюции и не являются монолитными [68].

В табл. 2 представлены сведения об астероидах со спутниками, сближающихся с Землей и астероиде, пересекающим орбиту Марса — 5407 1992 АХ. Спутники в этой группе обладают скромными размерами; двойные астероиды вследствие малой силы взаимной гравитации представляют собой более тесные системы по сравнению с объектами первой группы. Расстояния между компонентами данной группы составляют от 1.5 до 8 диаметров главного компонента. Среднее значение диаметров главного компонента около 1 км, а диаметр спутника обычно меньше его в 2-3 раза.

Методы исследования АСЗ позволяют выявлять контактно-двойные астероиды. Большой интерес представляют необычные формы АСЗ, которые демонстрируют радарные изображения. «Мягкие» приливные воздействия при близком прохождении АСЗ около больших планет могут привести к существенному изменению конфигурации астероидов: к увеличению вытянутости, образованию тесных спутниковых систем и, в дальнейшем, к образованию или возможной потере спутников. Астероид 1620 Географ имеет наиболее вытянутую форму из всех известных объектов в Солнечной системе. Л. Г. Карачкина с коллегами [12] предположили, что этот астероид имеет один или несколько малых по размеру спутников. Определения плотности астероидов по движению компонентов двойных АСЗ показали низкие ее значения. Для астероидов групп Аполлона 1991 VH и Амура 1994AW1 она оказалась равной 1.7 г/см^3 , а для астероида группы Аполлона 1996 FG3 — 1.4 г/см^3 . Такие низкие плотности свидетельствуют о высокой пористости этих тел.

Двойные астероиды во внешней части Солнечной системы. Первый объект пояса Койпера диаметром около 280 км был открыт в 1992 г. и

Таблица 2. Спутниковые системы астероидов среди астероидов, сближающихся с Землей

Номер и название (предварительное обозначение)	Динами- ческий тип орбиты	Характеристики спутниковой системы					Литературный источник
		D_p , км	$\frac{D_s}{D_p}$	a, км	$P_{орб}$, сут	$P_{перв.}$ ч	
1620 Geographos	Ам	5.1×1.8	0.1	3.17	5.38	5.22	[13]
3671 Dionysus	Ам	1.5	≥0.28	2.20	27.72	2.70	IAU Circ. N 6680, 1997
4179 Toutatis	Ап	—	0.91	—	79	68.4	[31]
4197 1982 TA	Ап	2.0	1	8.8	20.26	3.54, 4.37	[21]
5381 Sekhmet	Ат	1.0	0.3	1.54	12.5	2.7	IAU Circ. N 8163, 2003
5407 1992 AX	Мк	4.0	≥0.3	6.8	13.52	2.55	[106]
31345 1998 PG	Ам	0.9	≥0.3	1.5	14.01	2.52	[106]
35107 1991 VH	Ап	1.2	0.40	3.2	32.69	2.62	IAU Circ. N 6607, 1997
65803 Didymos	Ам	0.8	0.19	1.2	11.90	2.26	IAU Circ. N 8244, 2003
66063 1998 RO1	Ат	0.9	≥0.4	0.8	14.53	2.49	IAU Circ. N 8216, 2003
66391 1999 KW4	Ат	1.2	≥0.3	2.6	18.24	2.76	IAU Circ. N 7632, 2001
69230 Hermes	Ап	0.4	1.0	1.0	13.89	13.89	IAU Circ. N 8225, 2003
85938 1999 DJ4	Ап	0.7	0.5	1.5	17.72	2.51	IAU Circ. N 8329, 1999
88710 2001 SL9	Ап	1.0	0.31	1.8	16.40	2.40	IAU Circ. N 7742, 2000
1990 OS	Ап	0.3	0.15	>0.6	18—24	—	IAU Circ. N 8237, 2003
1994 AW1	Ам	0.9	0.53	2.1	22.40	2.52	IAU Circ. N 6607, 1994
1996 FG3	Ап	1.4	0.31	2.4	16.14	3.59	[106]
1998 ST27	Ат	0.8	0.15	4.50	~100	3.1	IAU Circ. N 7730, 2001
1999 HF1	Ат	3.5	0.24	7	14.02	2.32	[105]
2000 DP107	Ап	0.8	0.38	2.62	42.23	2.78	IAU Circ. N 7503, 2000
2000 UG11	Ап	0.23	0.43	0.34	18.48	4.44	IAU Circ. N 7518, 2000
2002 BM26	Ам	0.6	0.17	<1.5	≥72	2.7	IAU Circ. N 7824, 2002
2002 CE26	Ап	3	0.07	5	16	3.29	IAU Circ. N 8397, 2002
2002 KK8	Ам	0.5	0.2	—	—	—	IAU Circ. N 7921, 2002
2003 SS84	Ап	0.12	—	≥0.3	12—24	—	IAU Circ. N 8220, 2003
2003 YT1	Ап	1.0	0.18	~2.7	~30	2.34	MPE Circ. 2003-Y30
2005 AB	Ам	1.2	0.24	2.5	17.9	3.34	IAU Circ. N 8483, 2005

получил обозначение 1992 QB1. К апрелю 2005 г. было открыто около 900 транснептуновых объектов. Все они обращаются вокруг Солнца в прямом направлении (как большие планеты). Новооткрытые тела имеют диаметр 100—800 км и темную красноватую поверхность, что указывает на ее древний состав и возможное наличие органических соединений. Судя по оценкам, в поясе Койпера около 70 000 объектов с диаметрами более 100 км. В целом это скопление малых тел в сотни раз массивнее главного пояса астероидов, расположенного между орбитами Юпитера и Марса, но уступает по массе гигантскому кометному облаку Оорта, простирающемуся на тысячи астрономических единиц от Солнца. Последние исследования показывают, что классические объекты по своим физическим характеристикам делятся на две популяции. В первую входят более мелкие, старые и красные объекты с малыми наклонами орбит. Вторая популяция содержит более крупные объекты, наклоны их орбит больше. Среди последних наблюдается большое разнообразие цветов.

В табл. 3 приведены данные для 13 астероидов со спутниками, принадлежащих разным группам, отличающимся орбитальными характеристиками. Все эти объекты, имеющие размер большой полуоси более 30 а. е., принадлежат поясу Эйджворта — Койпера и получили название транснептуновых объектов (ТНО). В зависимости от орбитальных характеристик они делятся на группы. Девять объектов относятся к классу Кубеванос (Cubewanos). Это классические транснептуновые объекты, большие полуоси их орбит попадают в диапазон 40.5 а. е. < a < 47 а. е. Название произошло от первого открытого объекта 1992 QB1. Один астероид относится к объектам рассеянного диска (ОРД). Три объекта принадлежат к типу Плутинос (Plutinos). Они находятся в резонансе 2:3 с Нептуном подобно

Таблица 3. Двойные астероиды во внешней части Солнечной системы

Номер и название (предварительное обозначение)	Динамический тип орбиты	Характеристики спутниковой системы					Литературный источник
		D_p' км	$\frac{D_s}{D_p}$	a , км	$P_{\text{орб.}}$ сут	$P_{\text{перв.}}$ ч	
26308 1998 SM165	Плутино	420	0.4	6000	2 0	7.98	IAU Circ. N 7807, 2002
47171 1999 TC36	Плутино	590	0.42	8000	14	>8	IAU Circ. N 7807, 2002
58534 1997 CQ29	Кубевано	80	0.82	8000	312	—	IAU Circ. N 7824, 2002
66652 1999 RZ253	Кубевано	166	0.83	4700	42.26	—	IAU Circ. N 8143, 2003
88611 2001 QT297	Кубевано	176	0.69	31400	880	—	IAU Circ. N 7733, 2001
1998 WW31	Кубевано	130	0.83	22300	570	—	MPE Circ. 2001-G29
2000 CF105	Кубевано	170	0.85	23000	500	—	IAU Circ. N 7857, 2002
2000 CQ114	Кубевано	260	0.81	5900	35	—	IAU Circ. N 8289, 2003
2001 QC298	Кубевано	420	—	3000— 7000	15	—	IAU Circ. N 8034, 2002
2001 QG298	Плутино	260	1?	400	13.77	—	[110]
2001 QW322	Кубевано	130	1	130000	1500	—	MPE Circ. 2001-V34
2003 QY90	ОРД	280	0.9	10000	40	—	IAU Circ. N 8235, 2003
2003 UN284	Кубевано	190	0.76	60000	1800	—	IAU Circ. N 8251, 2003

Плутону. Большие полуоси этой группы объектов расположены в диапазоне 39 а. е. $< a < 40.5$ а. е. Для спутников астероидов этой части Солнечной системы характерны размеры, сравнимые с размерами главного компонента.

Принадлежность астероидов со спутниками к разным динамическим группам приводит к большому разнообразию их характеристик. Для объектов пояса Койпера характерны большие расстояния между компонентами, для АСЗ — наличие тесных двойных пар. Для большей части двойных астероидов ГПА нередко принадлежность к семействам и связь с резонансами по среднему движению с большими планетами.

Списки двойных астероидов, приведенные в табл. 1—3, содержат объекты сайта (<http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>), а также астероиды, исследованием двойственности которых авторы занимались в течение ряда лет. Отметим также, что есть несколько списков астероидов, заподозренных в двойственности, например список <http://www.johnstonsarchive.net/index.html>. Существенная часть этих объектов нуждается в дальнейших исследованиях для подтверждения их двойственности.

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ АСТЕРОИДАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Перечисленные в табл. 1—3 астероиды со спутниками были открыты различными методами наблюдений. Рассмотрим, какие именно современные методы были использованы и что они позволяют обнаружить. Отметим, что визуальные наблюдения сейчас 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 постепенно отпадает.

Наземные наблюдения изображений спутников астероидов. 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 квантовой эффективности, предъявляются три основных требования: высокое угловое разрешение, широкий динамический диапазон и возможность регистрации изображения слабого объекта рядом с ярким.

Создание в последние десятилетия XX века ряда крупных и оснащенных современным оборудованием обсерваторий на Гавайских и Канарских островах, в Чили и в ряде других мест с превосходными астроклиматическими условиями не может полностью решить проблему высокого углового разрешения путем выбора наилучшего места. Проблема дальнейшего повышения углового разрешения решается с помощью использования методов, позволяющих реализовать разрешающую силу крупного телескопа.

Широкий динамический диапазон и возможность регистрации изображения слабого объекта рядом с ярким обеспечивается характеристиками используемого приемника 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 изображение.

Для успешной регистрации спутников должна быть использована 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 хорошие ночи.

Фотография и электронография. В 1979—1980 гг. в Китае на высокогорных обсерваториях Пурпурная Гора и Юннан с помощью 0.6- и 1.0-м телескопов с экспозициями в несколько секунд на протяжении 13 ночей фотографировался астероид 9 Метиды (Metis), находившийся на расстоянии 1.23 а. е. от Земли [111]. Была получена серия из восьми фотографий, имеющих достаточно высокое угловое разрешение. Расстояние между компонентами астероида изменялось от 0.93" до 1.2", период обращения спутника составил 4.61^d, большая полуось орбиты — 1100 км. По оценкам средняя плотность равна 2.5 г/см³, диаметр Метиды 153 км, спутника — 60 км.

Электронная фотография или электронографический метод наблюдений обладает высокой квантовой эффективностью и позволяет регистрировать малоконтрастные изображения, обеспечивая пороговый контраст до 0.5 %. Электронные камеры, в которых производится непосредственная регистрация каждого фотоэлектрона, позволяют регистрировать большие перепады яркости у близко лежащих объектов. Однако сложность работы с ними сыграла решающую роль, и они практически довольно быстро вышли из употребления.

Появление ССD-матриц, являющихся одним из типов современных телевизионных твердотельных приемников света, практически вытеснило электронографию из области астрономических наблюдений.

Телевизионные наблюдения с вакуумными и твердотельными (ССD-матрицами) передающими телевизионными приборами. Телевизионные системы для астрономических наблюдений делятся на два класса в зависимости от того, какой фотоэффект используется в светоприемном устройстве: внешний или внутренний [1]. К первому принадлежат все вакуумные передающие трубки, ко второму — все твердотельные передающие приборы, ССD-матрицы, или приборы с зарядовой связью.

Необходимость преобразования оптического изображения в последовательность электрических сигналов приводит к ограничению возможностей получения изображения слабого объекта рядом с ярким. В разных классах приборов причины этого ограничения различны, но для всех характерны либо увеличение размера яркого объекта (расплывание, ореолы), либо расплывание изображения по строке. Этот недостаток телевизионных приборов необходимо учитывать при постановке задачи прямой регистрации спутников астероидов. Наличие многообразных типов программ обработки изображений полей звезд, производящих всевозможные редукации вплоть до

восстановления контуров тесно расположенных звезд — все это позволяет уменьшить имеющиеся недостатки.

Благодаря высокой квантовой эффективности, широкому динамическому диапазону, возможности регистрации малых контрастов и обработке данных в памяти ЭВМ, телевизионные приемники света и особенно современные CCD-матрицы нашли широкое применение для исследования астероидов и поиска у них спутников.

Спеклинтерферометрический метод. Около 30 лет назад появился метод повышения углового разрешения при наземных астрофизических исследованиях на крупных телескопах — спеклинтерферометрия. Известно, что оптические неоднородности земной атмосферы, расположенные между исследуемым объектом и телескопом, обуславливают пятенную (speckles) структуру изображения небесного объекта, получаемого с короткой экспозицией порядка сотых долей секунды в достаточно узком интервале длин волн. Телевизионный цифровой спеклинтерферометр 6-м телескопа позволил провести массовые исследования двойных звезд, имеющих расстояния между компонентами от $0.812''$ до $0.025''$, причем средняя квадратичная ошибка измерения расстояний составила $0.0026''$, а разница блеска компонентов не превышала 3^m [2]. Проницательная способность достигает 16^m , что позволяет обнаруживать спутники у астероидов.

Опыт наблюдений ряда астероидов был проведен на 2.3-м телескопе Стюардской обсерватории в США [61]. В 1980 г. была опубликована краткая информация [77] о наличии спутников у астероидов 2 Паллада и 12 Виктория (Victoria). На основе обработки данных сделано предположение, что Паллада имеет небольшой синхронный спутник, расположенный на расстоянии 2.7 радиуса от центра главного компонента и имеющий блеск на 4^m меньше блеска астероида.

Первые опыты спеклинтерферометрических наблюдений, проведенных с целью поиска спутников у астероидов, не дали уверенных результатов. Однако в будущем этот метод может успешно использоваться для подтверждения сложной структуры отдельных астероидов.

Адаптивная оптика. Проблема повышения углового разрешения решается в настоящее время путем исправления светового волнового фронта, идущего от исследуемого объекта с помощью методов адаптивной оптики (АО). Сигналы для управления специальным деформируемым зеркалом (или системой зеркал) приходят от датчика волнового фронта, который в реальном времени (около 1 мсд) измеряет оптические aberrации. Сервосистема стремится свести aberrации к нулю, постоянно подстраивая форму деформируемого зеркала. Размеры корректирующих элементов обычно от 10 см до 1 м, а количество элементов составляет от 13 до 300. Например, на 10-м телескопе Кека удается дойти до разрешения $0.046''$.

Наблюдения астероидов с адаптивной оптикой активно проводятся на канадско-французско-гавайской обсерватории (CFH), расположенной на горе Мауна-Кеа на Гавайях, и в других обсерваториях. Приведем несколько примеров. На рис. 2 показаны результаты наблюдений спутника у астероида 45 Евгения.

Крупный двойной астероид ГПА 90 Антиопа в оппозицию 1996 г. демонстрировал кривую блеска с изменением его яркости в два раза. А при другой ориентации амплитуда кривой блеска не достигала даже 0.1^m . В августе 2000 г. Мерлин и др. на телескопе Кеck II с помощью адаптивной оптики установили его двойственность [IAUC 7503]. Астероид является тесной системой и состоит из двух компонентов диаметром 85 км, отношение большой полуоси орбиты к радиусу равно двум (рис. 3, а). Во время наблюдений этого астероида в 2001—2002 гг. кривая блеска показала синхронное вращение компонентов с периодом 16.5 ч. Наблюдения позволили дать оценку плотности — 1.3 г/см^3 .

На Гавайях же получено изображение спутника крупного астероида 762 Пулкова (рис. 3, б). Размеры астероида 170 км, спутника — 18 км, и расстояние между ними — 1400 км. Проведен и ряд других успешных наблюдений.

Адаптивная оптика оказалась весьма перспективной для поиска спутников у астероидов и позволила определить двойственность девяти астероидов ГПА и одного троянца Юпитера.

Регистрация спутников астероидов при покрытиях звезд. Явления покрытий звезд астероидами (своеобразные затмения, видимые в определенных местах на Земле) с 1975 г. получили широкое развитие [51, 91]. В наблюдениях участвовали не только профессионалы, но и опытные любители астрономии. Все они располагались внутри затменной полосы и в непосредственной близости от нее. Это увеличивало ценность наблюдений, так как по размерам и видимости тени можно было определить диаметр астероида и его форму [114].

По результатам этих наблюдений были сделаны предположения о наличии спутников у ряда астероидов, так как 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 [62]. Размеры тел, дававших вторичный эффект, были меньше, чем астероид, и было высказано мнение, что они являются спутниками наблюдавшихся астероидов [76].

Пересмотр результатов более ранних наблюдений покрытий звезд позволил выявить возможное наличие спутников у астероидов: 2 Паллады, 3 Юноны, 6 Гебы, 9 Метиды, 12 Виктории, 129 Антигоны, 433 Эроса, а также 18 Мельпомены [51]. В работе [76] приводятся еще несколько астероидов, заподозренных в двойственности. В 1982 г. во Франции в Медонской обсерватории с помощью различных методов

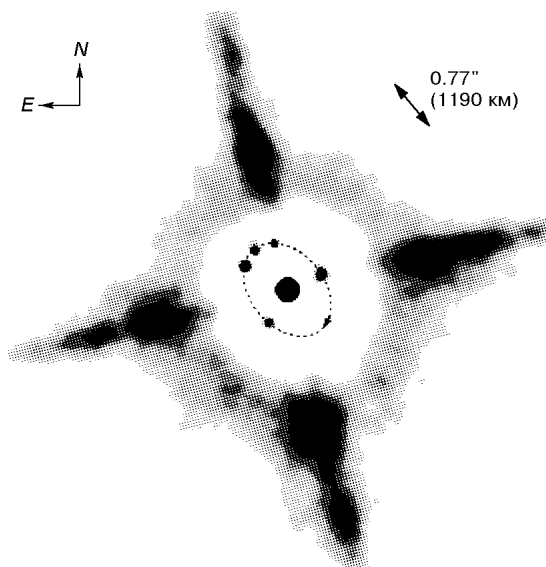


Рис. 2. Астероид 45 Евгения со спутником. Положение спутника показано схематически для пяти моментов времени. Снимок получен в инфракрасном диапазоне длин волн на 3.6-м телескопе

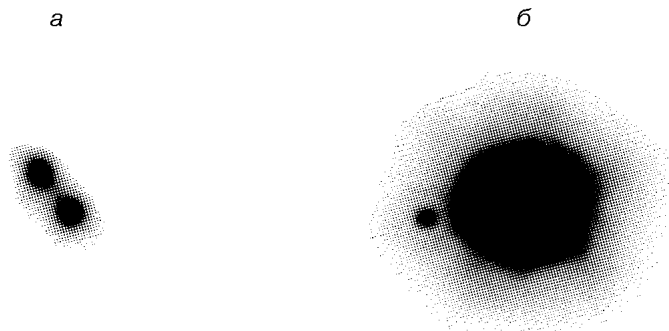


Рис. 3. Снимки двойного астероида 90 Антиопа (а) и астероида со спутником 762 Пулкова (б), полученные с адаптивной оптикой на Гавайях

проводились одновременные наблюдения покрытия звезды астероидом 146 Луциния, в результате чего был найден спутник диаметром 6 км [45].

В настоящее время наблюдения покрытий звезд астероидами продолжается. С начала 1960-х гг. благодаря этим наблюдениям заподозрено, что еще более 300 астероидов могут иметь спутники (http://www.bdl.fr/observateur/binast/binary_ast.php).

Наблюдения с борта космических аппаратов. Программа исследований астероидов с борта космических аппаратов была составлена более 30 лет назад. Целью ее является получение данных, недоступных для наземных обсерваторий.

В августе 1993 г. КА Галилей пролетел около астероида 243 Ида [46]. Изображение самого астероида было принято на Земле в августе 1993 г., а изображение его спутника было передано значительно позже, лишь в феврале 1994 г. (рис. 1). Наличие спутника оказалось полной неожиданностью. Спутник, получивший имя Дактиль, имеет размер $1.6 \times 1.4 \times 1.1$ км и выглядит практически сферическим. Его альbedo, спектр и состав, по-видимому, такие же, как у самого астероида Ида, имеющего размер $56 \times 24 \times 21$ км и вращающегося с периодом 4.63 ч [46].

Телескопы, работающие в космосе, в частности телескоп Хаббла, обеспечивают получение снимков астрономических объектов с высоким угловым разрешением. Приведем результаты наблюдений нескольких астероидов, имеющих спутники.

Астероид 1998 SM165 (рис. 4) является одним из самых крупных транснептуновых объектов, диаметр которого более 400 км, а блеск изменяется на 0.56^m в течение 4 ч, альbedo равно 0.04, а размер — 600×360 км. В январе 2002 г. Браун и Тружилло сообщили об открытии спутника у этого астероида с помощью космического телескопа Хаббла [IAUC 7807]. Диаметр первичного компонента составляет около 420 км, а диаметр спутника — около 170 км. Двойная система имеет орбитальный период 327 лет. Орбита сильно вытянута ($e = 0.37$).

Астероид 1998 WW31 (рис. 5) был открыт в 1998 г. Его двойственность была обнаружена 22 декабря 2000 г. Кристианом Вейле и др. на канадско-французско-гавайском телескопе (3.6 м). Астероид 1998 WW31 находится на расстоянии 45.6 а. е. от Земли, его блеск составляет 23.6^m , диаметр — около 150 км. В оппозицию 2001/2002 были получены наблюдения на телескопе Хаббла. Были уверенно определены параметры орбиты. Необычайно большим оказался эксцентриситет орбиты вторичного компонента ($e = 0.8$). Период обращения 570^d , расстояние между компонентами изменяется от 4 тыс. до 40 тыс. км. Альbedo равно 0.07, астероид довольно темный. На



Рис. 4. Две фотографии двойного астероида 1998 SM165, полученные с помощью телескопа Хаббла. Справа от яркого объекта виден слабый спутник, положение которого смещается

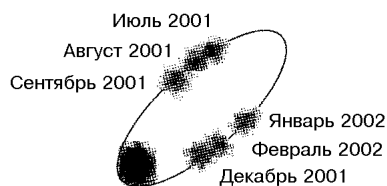


Рис. 5. Схема, показывающая перемещение изображения спутника двойного астероида 1998 WW31 с июля 2001 г. по февраль 2002 г. Снимки получены с помощью телескопа Хаббла

основе наблюдений взаимного движения астероида и его спутника удалось определить плотность объекта (1.5 г/см^3). В марте 2001 г. был обнаружен спутник у астероида 107 Камилла. Это один из самых крупных известных на сегодняшний день двойных астероидов с диаметром главного компонента примерно 237 км. Размер спутника оценивается величиной, в 25 раз меньшей.

Наблюдения, полученные из космоса с помощью телескопа Хаббла, позволили установить наличие спутников у десяти астероидов, из них семь ТНО и три астероида ГПА, а также позволили определить параметры орбит спутников этих астероидов.

Планируются дальнейшие исследования астероидов с борта космических аппаратов. Так, стартовавший 2 марта 2004 г. с космодрома Куру во французской Гвиане космический аппарат «Розетта» по пути к комете Чурюмова—Герасименко сблизится с двумя астероидами: 2867 Штейнс (5 сентября 2008 г.), и с крупным астероидом 21 Лютеция (10 июля 2010 г.). Исследование будет произведено с близкого расстояния с целью изучения их глобальных характеристик, динамических параметров, морфологии и состава поверхности. В мае 2006 г. запланирован запуск КА Dawn («Рассвет»), который в 2019 г. будет исследовать крупнейший астероид Веста, а в 2014 г. подлетит к астероиду Церера.

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 локации до десятков метров [94]. Вращение астероидов дает уширение отраженного ими эхо-сигнала. Данные таких наблюдений позволяют получить информацию о форме астероида [93, 99].

Проводились систематические радарные наблюдения астероидов главного пояса и астероидов, приближающихся к Земле [94]. Наблюдения в августе 1989 г. астероида 4769 Касталия дали указание на его вытянутую форму. Остро с сотрудниками [98] определили его размеры 1×1.7 км, плотность 2.6 г/см^3 и заключили, что он, возможно, является контактной двойной системой.

В декабре 1992 г. на минимальное расстояние 0.024 а. е. (3.6 млн км) к Земле приблизился астероид 4179 Тугатис. Радиолокационные наблюдения проводились двумя группами ученых [8, 10, 94, 95]. Планетный локатор Центра дальней космической связи, расположенный в Крыму под Евпаторией, посылал радиосигнал, а 100-м антенна, расположенная в г. Эффельсберг в Германии, принимала отраженный эхо-сигнал. Отраженный сигнал дал два максимума, показывающих возможную двойственную структуру объекта. Оценена плотность пород поверхности астероида (1.5 г/см^3). А. Л. Зайцев и др. [9, 118] впервые обратили внимание на квазипериодические быстрые колебания отраженного астероидом сигнала и интерпретировали их как картину интерференции эхо-сигналов, отраженных от двух компонентов астероида.

С помощью радарных наблюдений, организованных Лабораторией реактивного движения НАСА и радиообсерваторией в Аресибо, была установлена двойственность нескольких АСЗ: 1998 ST27, 1999 KW4, 2000 DP107 и 2000 UG11. Радарные наблюдения 18—20 октября 2003 г. Марго и др. [IAUC N 8225] позволили обнаружить у астероида Гермес (1937 UB) выраженную двойственную структуру. Астероид состоит из двух объектов размером 300—450 м, синхронно вращающихся вокруг общего центра масс и вокруг своих осей. Отношение большой полуоси орбиты вторичного компонента к радиусу первичного компонента составляет около 2.5. Возможно, двойной астероид имеет и более мелкие спутники [82].

Радиолокационный метод является перспективным в исследованиях сложной структуры астероидов. Около 10 % исследованных с его помощью астероидов показали двойственную структуру [96—98, 100]; были обнаружены спутники у двенадцати астероидов АСЗ.

Исследования двойных астероидов по фотометрическим данным. 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. Анализ фотометрических наблюдений астероидов дает возможность определить наличие спутника у астероида. Рассмотрим, как это делается.

Возможности современной фотометрии. Фотометрические наблюдения астероидов позволили получить информацию о периодах изменения их блеска, которые интерпретированы как периоды их вращения, о расположении оси вращения в пространстве, о направлении вращения, а также об их форме в предположении, что она хорошо представляется трехосным эллипсоидом вращения [49, 75, 85, 87, 88]. Фотометрические данные собраны в разных каталогах. Например, находящийся в интернете каталог содержит около 9000 кривых блеска более чем для 1000 астероидов (<http://www.astro.helsinki.fi/~jtpesone>).

Использование CCD-матриц и телевизионных приемников света открывает возможность одновременной регистрации блеска астероида и звезд поля. Высокая фотометрическая точность и большое количество измерений позволяют регистрировать на кривых блеска мелкие детали, которые несут сведения о наличии спутника. Чем выше точность, тем меньшие перепады яркости могут быть зарегистрированы и тем меньший по размеру спутник может быть обнаружен фотометрическими наблюдениями.

Фотометрические признаки мультикомпонентности астероидов. В конце 1970-х гг. Тедеско [113] обратил внимание, что кривые блеска астероидов 49 Палес и 171 Офелия имеют практически плоские максимумы и 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 1980-х гг. [86], позволили оценивать параметры компонентов астероида.

Челино и др. [56] сформулировали следующие признаки двойственности: а) наличие плоского минимума на кривой блеска, свидетельствующего о полном затмении; б) сильные изменения амплитуды кривой блеска в зависимости от фазового угла освещения астероида Солнцем, что вызвано взаимным затеняющим эффектом, который различен при разных фазах; в) значительные изменения наклонов восходящих и нисходящих ветвей кривых блеска от цикла к циклу, вызванное изменяющимися моментами начала и конца затмений; г) наличие очень широкого максимума по сравнению с резкими узкими минимумами.

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. Вероятность обнаружения далеко расположенного спутника также мала, ибо затмения непродолжительны и могут наблюдаться только когда луч зрения лежит в экваториальной плоскости астероида.

Наличие мультипериодичности в изменениях блеска астероидов может свидетельствовать о двойственной или более сложной структуре астероида [18, 19, 22, 31, 48, 53, 62, 107, 108]. Сложные по композиции астероиды показывают, как правило, несколько периодов: орбитального движения,

вращения компонентов, прецессии осей вращения и орбиты.

Частотный анализ фотометрических данных. Примеры. 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.

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 изменяется фазовый угол, определяющий освещенную Солнцем часть диска, и угол между осью вращения 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, этот интервал значительно короче.

Особенностью фотометрических рядов, получаемых при наземных наблюдениях, является их разрывность, вызванная условиями видимости исследуемого объекта. В астрофизике разработаны несколько методов, позволяющих достаточно уверенно проводить анализ таких рядов, имеющих большую скважность. Они подробно описаны в монографии В. Ю. Теребижа [39]. 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.

Отметим, что большое значение имеет регистрация 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 периоды вращения компонентов. Так было, например, в случае астероида 87 Сильвия [23].

Исследования характеристик движения компонентов астероидов с помощью частотного анализа плотных фотометрических рядов были начаты В. В. Прокофьевой и др. в Крымской астрофизической обсерватории (КраО) в начале 1990-х гг. Ниже представлены результаты исследования четырех астероидов. Два из них — 87 Сильвия и 423 Диотима являются крупными астероидами, для которых вероятность столкновений и разрушений выше, чем для более мелких астероидов [69—71]. На основании этого можно было ожидать наличия их сложной структуры. 4179 Тоутатис и 1620 Географ относятся к астероидам, сближающимся с Землей.

Наблюдения всех четырех объектов были выполнены на цифровом телевизионном комплексе полуметрового менискового телескопа КраО. Наборы светофильтров обеспечивали инструментальную фотометрическую систему, близкую к системе B, V Джонсона—Моргана и R Джонсона [35]. В основу методики фотометрических измерений блеска астероидов положен принцип повышения надежности получаемых данных за счет одновременного использования двух методов классической фотометрии: дифференциального и фундаментального [20, 25].

Анализ фотометрических данных астероида проводился с помощью составленных М. Ю. Клепиковым и К. В. Прокофьевой пакетов программ, позволяющих вести поиск частот одновременно тремя методами, строить свертки и отбеливать данные за найденные периоды [30, 39]. Отметим, что широко распространенные сейчас методы частотного анализа данных астрофизических наблюдений, основанные на фурье-анализе, неудобны тем, что

предполагают только синусоидальную форму колебаний, и в случае исследования астероидов, имеющих два максимума за период, надо использовать вторую гармонику найденной частоты.

Амплитуда изменения блеска астероида 87 Сильвия переменна в диапазоне от 0.30^m до 0.62^m [85]. Анализ блеска в полосе *B* показал наличие периода прецессии и известного периода вращения астероида 0.2159853^d . Частотный анализ дважды отбеленных за эти периоды данных показал наличие двух значений периодов: 0.221^d и 0.12^d . Анализ показателей цвета позволил уточнить значения этих периодов: 0.2207^d и 0.120^d и показал полное отсутствие известного периода вращения астероида. Факт отсутствия последнего в цветовых изменениях позволил В. В. Прокофьевой и М. И. Демчику [23] предположить, что астероид представляет собой тесную пару компонентов. Анализ многочисленных наблюдений астероида Сильвия позволил уточнить величину периода прецессии 31.7^d [24]. Оценки параметров орбиты спутника и прецессии показали, что, возможно, прецессирует орбита второго компонента, а вызвана прецессия наличием третьего тела, движущегося по круговой орбите в плоскости эклиптики [12]. Такое тело было обнаружено в феврале 2001 г. сотрудниками Калифорнийского технологического института с помощью адаптивной оптики [IAUC 7588]. Радиус орбиты спутника 1200 км, а размер его в 20 раз меньше размера тела астероида. Дополнительный частотный анализ фотометрических данных позволил обнаружить период прецессии, вызванный этим спутником [27], и показать, что астероид Сильвия является тройным.

Наблюдения астероида 423 Диотима были получены в фотометрической полосе *V*. Частотный анализ рядов наблюдений показал наличие двух периодов 0.621^d и 0.190^d , которые согласно предположению В. В. Прокофьевой и Л. Г. Карачкиной [26], являются периодами вращения компонентов астероида. Если орбита спутника синхронизована, то орбитальный период и период вращения одного из компонентов совпадают.

В 1992—1993 гг. были проведены исследования астероида 4179 Тоутатис во время его приближения к Земле на расстояние до 3.6 млн км. Радиолокационные наблюдения [100] показали, что он, возможно, состоит из двух фрагментов. Фотометрические наблюдения Тоутатиса проводились во многих обсерваториях мира [112]. Анализ фотометрических данных в широком диапазоне частот был проведен по объединенным наблюдениям в Крыму и Харькове [31]. Удалось выделить три основных периода: 7.48^d , 2.85^d и 1.66^d , причем два последних по предположению В. В. Прокофьевой и др. [31] являются периодами вращения компонентов. 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 [9] компоненты астероида находились на линии астероид — локатор, причем более крупный был ближе к наблюдателю. Интересно отметить, что в наблюдениях, полученных в это время, нет периода 1.66^d , являющегося периодом вращения меньшего по размеру компонента. Отметим, что по данным радиолокации построена модель астероида Тоутатис как единого тела, состоящего из двух шаров.

Астероид 1620 Географ имеет амплитуду изменения блеска более 2^m . В 1994 г. были проведены его многосторонние исследования. На базе данных, собранных в каталоге фотометрических наблюдений астероида, и собственных наблюдений, полученных в КрАО, был проведен частотный анализ тонких фотометрических эффектов в колебаниях его блеска [13, 28, 108]. Анализ подтвердил монолитность тела астероида. Кроме известного периода вращения были обнаружены периоды 0.8^d и 2.8^d . Последний был интерпретирован как период вынужденной прецессии, что позволило сделать предположение о наличии у астероида одного или нескольких небольших

спутников. Радарные наблюдения не опровергают этого предположения [101], а связь Географа с метеорными потоками [32, 33] подтверждает возможность наличия у него небольших спутников.

Фотометрические наблюдения и их исследования дали возможность установить двойственность самого большого количества объектов — двадцати трех, из которых восемнадцать АСЗ и пять ГПА.

Моделирование спутниковой системы астероида 1996 FG3. Кривые блеска, полученные с помощью фотометрии, позволяют провести моделирование двойного астероида. Примером является работа Н. Б. Железнова, выполненная по моделированию двойного астероида 1996 FG3, имеющего два периода 16.14^h и 3.59^h [7]. Первый из них — орбитальный, а второй — период вращения главного компонента. Экваториальные плоскости компонент совпадают с плоскостью орбиты спутника. Было сделано допущение, что движение компонентов происходит по закону Кеплера вокруг общего центра инерции, а последний движется по гелиоцентрической кеплеровой орбите. Результаты моделирования позволили получить следующие основные параметры двойной системы: средний диаметр главного компонента — 1.471 км, средний диаметр спутника — 0.428 км, плотность компонентов — 1.055г/см^3 , период обращения компонентов вокруг общего центра инерции — 16.135^h , период вращения главного компонента — 3.594^h . Определены также точные размеры полуосей главного компонента и спутника и параметры орбиты спутника.

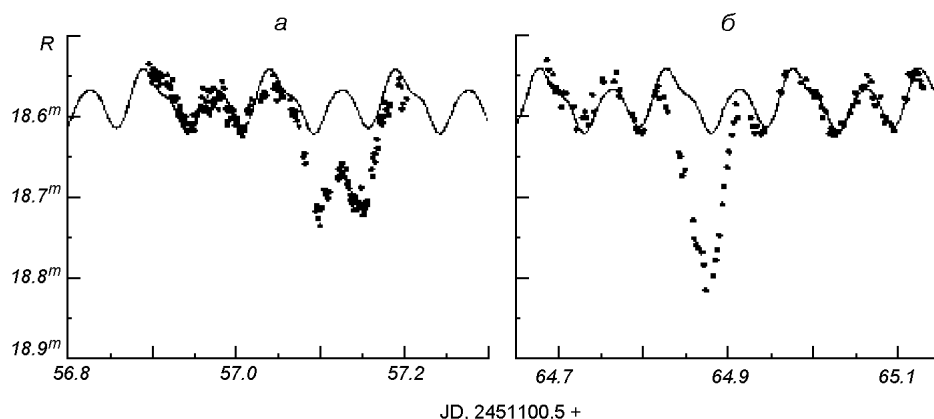


Рис. 6. Кривая блеска астероида 1996 FG3: *a* — вторичный минимум, *б* — первичный минимум

Примеры кривых блеска астероида 1996 FG3 приведены на рис. 6 [7]. Короткий период изменений блеска объясняется вращением главного компонента. Особенность кривой блеска, связанная с взаимным явлением, имеет наибольшую амплитуду колебания. Она объясняется прохождением спутника и/или его тени по диску главного компонента и называется первичным минимумом (рис. 6, *б*). Вторая особенность объясняется покрытием и/или затмением более мелкого спутника главным компонентом и называется вторичным минимумом (рис. 6, *а*). Непрерывная кривая на этих рисунках построена с помощью частотного анализа колебаний блеска, вызванных вращением главного компонента. По характеру этой кривой можно сделать вывод о явно несимметричной форме главного компонента.

Модель тройного астероида 9969 Брайл. Изображения астероида 9969 Брайл были получены 29 июля 1999 г. при пролете мимо него космического корабля «Дип Спейс-1». Астероид имеет перигелийное расстояние 1.32 а. е. и относится к астероидам, пересекающим орбиту Марса. С расстояния

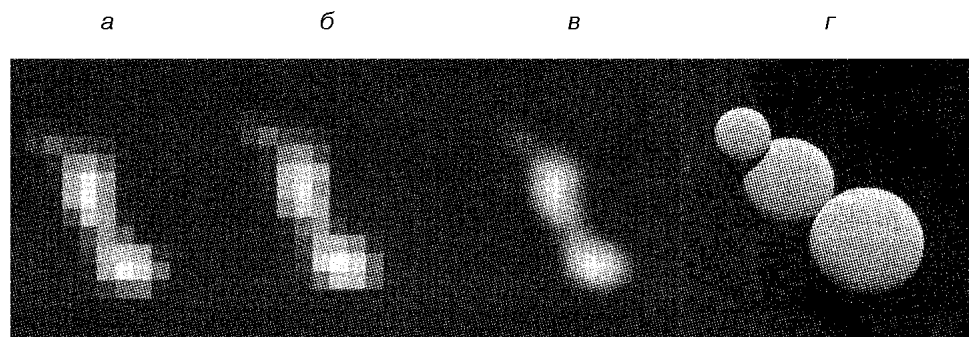


Рис. 7. Два снимка астероида 9969 Брайл (а, б), результат обработки этих снимков (в) и модель тройного астероида (г)

13500 км было получено два снимка, приведенных на рис. 7 слева и в центре. Справа на том же рисунке приведены результаты обработки этих снимков. Наземные фотометрические наблюдения астероида проводились с ноября 1998 г. по март 1999 г. Средний блеск астероида составлял $R = 17.04^m$, а амплитуда изменений яркости достигала 0.87^m . Был найден период вращения, равный 9.4^d , и размеры астероида: $2.1 \times 1 \times 1$ км.

Оберст и др. [92], используя как наземные фотометрические наблюдения, так и фотографии, полученные с борта космического корабля, построили модель астероида, состоящего из трех сферических тел (см. фото на рис. 7, г). Для простоты было принято, что астероид состоит из трех соприкасающихся тел сферической формы, центры которых расположены на одной линии. Построенная по вращающейся модели синтетическая кривая блеска достаточно хорошо согласуется с данными наземных наблюдений.

Приведенные данные о двойственности астероидов получены с помощью различных методов. История исследования проблемы двойных астероидов насчитывает всего несколько десятилетий, и знания об этих объектах еще очень скудны. Но развитие современных средств наблюдений и вычислительной техники позволяет надеяться на то, что в будущем нас ожидает немало интересных открытий в области исследования двойных астероидов.

НЕБЕСНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ СПУТНИКОВ У АСТЕРОИДОВ. ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДОВ

Выше уже отмечалось, что двойные астероиды не так уж редко встречаются в общей массе астероидов Солнечной системы [6, 47, 103]. Структура их достаточно разнообразна: массы главного тела и спутника могут быть сравнимы друг с другом, но может быть и так, что масса спутника много меньше, чем масса главного тела. Расстояние между компонентами может быть большим и достигать нескольких десятков радиусов главного компонента, а может быть малым, и тогда спутник движется совсем близко от поверхности главного компонента. Наклоны и эксцентриситеты орбиты спутника, а также углы ориентации плоскости орбиты относительно главного компонента могут быть самыми разными. Компоненты двойного астероида могут и соприкасаться друг с другом, и тогда двойной астероид называется контактным. В этом случае спутник лежит на поверхности главного компонента, образуя с ним как бы единое твердое тело, вращающееся вокруг общего центра инерции [6, 103]. Такое обилие вариантов структуры двойных астероидов невольно наводит на мысль о том, что к образованию двойных астероидов причастны несколько возможных механизмов. Рассмотрим их по порядку.

Происхождение двойных астероидов путем захвата. Теория захвата в небесной механике имеет достаточно длинную историю, ею занимался еще Шази [58]. Но настоящий интерес к ней возник лишь после работ О. Ю. Шмидта [44] и Ф. Г. Хильми [41, 42], когда появились первые достаточные критерии захвата в [17, 42], позволившие строго определить, произошел ли захват при сближении трех тел с ненулевыми массами.

Отметим, что при захвате не происходит столкновения и разрушения сближающихся тел, происходит лишь обмен энергиями, в результате которого образуется гравитационно связанная пара астероидов. Излишек энергии переходит к третьему телу, которое удаляется от точки сближения с более высокой скоростью, чем оно имело до сближения. Но вероятность такого события на порядок меньше, чем вероятность сближения двух астероидов. Кроме того, для захвата нужно, чтобы начальные условия сближающихся тел удовлетворяли целому ряду ограничений. Все это еще больше снижает вероятность захвата. Из этого с достаточной уверенностью следует вывод [114], что образование двойного астероида путем захвата при тройном сближении астероидов — достаточно редкое событие, и путем захвата вряд ли образуется сколько-нибудь заметная группа двойных астероидов. Однако совсем исключить механизм захвата в процессе образования двойных астероидов нельзя [104].

Образование гравитационно связанной пары тел при столкновении и разрушении астероидов. Этот механизм образования двойных астероидов получил в последние годы широкую поддержку научной общест-венности. Механизм захвата обломков, образующихся при ударном разрушении астероидов, прост в динамическом отношении и многое объясняет в особенностях двойных астероидов. В соответствии с этим механизмом два астероида сталкиваются при достаточно большой относительной скорости. Это приводит к разрушению одного или обоих астероидов; обломки разлетаются во все стороны с различными скоростями. Среди разлетающихся обломков может оказаться пара, летящая примерно в одном направлении с примерно одинаковыми скоростями, а ее компоненты сохраняют почти неизменное расстояние друг от друга. При таких условиях возможен захват одного компонента другим и образование гравитационно связанной пары астероидов. Размеры этих новых астероидов будут меньшими, чем были у родительских астероидов до столкновения [60, 64—67, 114].

Для проверки возможности захвата продуктов ударного дробления астероида при столкновении с другим астероидом были проведены численные эксперименты [65]. Они показали, что обломки размером около 30 км вполне способны захватить обломки размером больше 1 км с вероятностью около 5 %. Если же спутник имеет размеры порядка 140 м, то вероятность его захвата близка к 100 %.

При таком механизме образования гравитационно связанной пары возможны различные массы компонентов. Условия столкновения тоже могут быть разными. Если сталкиваются тела с резко различными массами, то большое тело может не разрушиться полностью, и произойдет лишь выброс продуктов дробления с образованием кратера. В зависимости от размера обломки могут разлетаться со скоростями, превышающими вторую космическую скорость относительно сохранившейся части родительского астероида, и тогда они совсем уйдут от нее. Если же их скорости относительно сохранившейся части меньше второй космической, то обломки останутся в окрестности сохранившейся части родительского астероида и могут образовывать с ним двойной или даже кратный астероид. Значительная часть обломков может упасть на родительское тело и образовать с ним контактный астероид. Д. Дурда [65] делает важный вывод: образование двойных астероидов — закономерное следствие обычных для кольца астероидов катастрофических столкновений.

И само столкновение, и разброс продуктов дробления изменяют скорость астероида, а следовательно, и его гелиоцентрическую орбиту, но особенно сильно изменяется вращение астероида: оно может от осевого вращения перейти к режиму кувыркания [103]. Поэтому вращательное движение астероида, существенно отличающееся от осевого, может свидетельствовать в пользу столкновительного происхождения двойного астероида.

Важной составляющей исследований, связанных с проблемой образования двойных астероидов, является изучение формы обломков астероидов, претерпевших катастрофические столкновения с достаточно крупными телами. Были проведены модельные эксперименты с ударным разрушением земных образцов материалов, близких по своим характеристикам к веществу каменных метеоритов. Тщательное исследование формы продуктов дробления показало, что в модельных образцах линейные размеры относятся в среднем как 1.41:1:0.71 при аппроксимации формы частицы трехосным эллипсоидом [55]. Было также исследовано распределение фигур большого числа реальных астероидов в тех случаях, когда параметры фигуры можно было определить из фотометрических наблюдений. Результат оказался поразительным: астероиды сравнительно небольших размеров (до 100 км) показали отношение линейных размеров, в среднем близким к тому же самому отношению 1.41:1:0.71 [57]. Отсюда был сделан вывод, что астероиды небольших размеров представляют собой продукты дробления, получающиеся при столкновениях более крупных астероидов.

Образование двойных астероидов под действием приливных сил. Этот механизм может иметь значение при прохождении астероида вблизи большой планеты. При таком прохождении возникает приливная сила, стремящаяся деформировать или разорвать астероид. Разрывы небесных тел приливными силами не так уж редки. Особенно часто такие разрывы происходят у ядер комет, пролетающих вблизи Юпитера [11, 59, 74]. Конечно, ядра комет — менее прочные образования, чем астероиды, поскольку их снегообразное вещество обладает меньшим сцеплением, чем вещество астероида. Но хорошо известно, что некоторые астероиды могут представлять собой груды слабо связанных друг с другом «булыжников». В этом случае даже небольшие приливные силы способны разорвать груды на составные части и придать им скорости, достаточные для ухода на гелиоцентрические орбиты. Характерной особенностью этого механизма являются небольшие взаимные скорости продуктов разрыва. Поэтому можно ожидать, что часть продуктов разрыва после прекращения действия приливных сил может объединиться в гравитационно связанные пары, то есть образует двойные астероиды. Нужно все же отметить, что астероид может быть разорван приливными силами и при более крепких связях составляющих его частей. Для этого достаточно обеспечить более тесное сближение астероида с приливообразующей планетой. Границу, за которой небесное тело разрушается приливными силами, обычно определяют из так называемого предела Роша [37]. Такая оценка границы разрыва не вполне точна, так как при этом не учитываются силы сцепления вещества. Однако считается, что ошибка, вносимая предположением об отсутствии сцепления, невелика.

Если разрыв или распад астероида произошел под действием приливных сил, то для образовавшегося роя более мелких астероидов можно указать точку или область, где части роя еще представляли собой единое тело [58]. Эта точка соответствует сближению родительского астероида с большой планетой, и следовательно, компоненты роя можно рассматривать, как астероиды, сближающиеся с планетой. Каждая из больших планет вблизи района, населенного астероидами, может иметь свои астероиды, сближающиеся с ней.

Так как при низких взаимных скоростях повышается вероятность образования гравитационно связанных пар, то следует ожидать увеличения

доли двойных астероидов среди астероидов, сближающихся с Землей, по сравнению с астероидами, не имеющими таких сближений. Этот феномен действительно наблюдается среди АСЗ [6].

Известно, что двойные АСЗ, как правило, имеют низкие плотности, сравнимые с плотностью воды. Поэтому считается, что компоненты двойных АСЗ представляют собой сильно пористые конгломератные структуры — «rubble piles» [7]. Такой обнаруженный наблюдениями факт является одним из аргументов в пользу того, что хотя бы часть двойных астероидов обязана своим происхождением приливному механизму.

Образование спутника астероида в результате аккреции пыли, окружающей астероид (теория Н. Н. Горькавого). Анализ известных теорий происхождения двойных астероидов привел Н. Н. Горькавого к мысли, что у всех этих теорий есть общий недостаток: слишком большую роль в них играет случайность. Все три описанных выше механизма для образования связанных пар требуют выполнения особых условий: для захвата нужны тройные сближения астероидов, для прямого столкновения двух астероидов и приливного разрушения одиночного астероида нужно очень точное соответствие орбит сталкивающихся или сближающихся объектов. Вероятность осуществления этих особых условий не может быть большой. Между тем, по мнению Н. Н. Горькавого, механизм образования двойных астероидов должен быть более универсальным. Поэтому он предложил новую модель образования спутников у астероидов и планет с твердой поверхностью [54]. Она описывает происхождение спутников астероидов без предположения о катастрофических столкновениях. Рост спутников идет за счет материала, выбитого с поверхности астероида при соударениях его с метеоритами, создающих пылевое облако вокруг него. Пылевые частицы в облаке слипаются, и начинается образование спутника или нескольких спутников, по аналогии с образованием планет из протопланетного облака в теории О. Ю. Шмидта [44].

Модель образования спутников астероидов, предложенная Н. Н. Горькавым, заключается в следующем: часть пролетающих по гелиоцентрическим орбитам частиц или мелких тел сталкивается с астероидом и выбивает из его поверхности значительное количество вещества, которое по массе превосходит ударяющее тело во много раз. Это происходит из-за высокой энергии ударяющего тела. Значительная доля выбитого вещества покидает астероид и может оставаться на орбите вокруг него. Другая часть выбитого вещества, описав эллиптическую дугу, снова падает на астероид. Важным моментом является накопление пылевого вещества на околоастероидных орбитах. Пылинки облака, сталкиваясь с вновь выбитыми с поверхности астероида частицами, уменьшают радиальную составляющую скорости и увеличивают ее азимутальную составляющую. Тем самым выброшенное вещество вовлекается в облако, вращение которого является прямым относительно вращения основного тела. Главная часть пыли группируется вблизи плоскости экватора основного тела, что делает облако похожим на диск. Это дискообразное облако является протоспутниковым.

Проблема динамической стабильности протоспутникового диска вокруг астероида была рассмотрена и решена Н. Н. Горькавым, который показал, что захват выброшенного с астероида вещества не вызывает дрейфа диска к главному телу и его падение на астероид. Этот феномен был исследован А. М. Фридманом и Н. Н. Горькавым [55, 56, 72] в применении к кольцам Урана, но его можно применить и к пылевым дискам астероидов. Получается, что вещество, выброшенное с поверхности вращающегося астероида, не просто вовлекается в пылевой диск, но и контролирует размеры диска, не давая ему ни приблизиться к главному телу, ни расширяться.

Существенным требованием для формирования спутника у астероида по рассматриваемой модели является его быстрое вращение. Можно обратить

внимание на то, что медленно вращающиеся большие планеты — Меркурий и Венера — спутников не имеют. Если данная модель правильно описывает процесс образования двойных астероидов, то спутники астероидов должны располагаться вблизи плоскостей экваторов главных тел.

Предложенная модель допускает ряд проверок наблюдениями. Остановимся на одной из них. Выше уже отмечалось, что существование спутника астероида тесно связано с наличием быстрого вращения главного тела: медленно вращающиеся астероиды, вероятнее всего, не имеют спутников, а астероиды со спутниками должны в среднем вращаться быстрее, чем одиночные астероиды. Чтобы обеспечить динамическую однородность условий, в работе [73] рассматривались только астероиды главного пояса и АСЗ. Список астероидов со спутниками для проверки был взят из сайта <http://www.johnstonarchive.net/astro> от 8 сентября 2004 г., в котором приводились характеристики для 57 двойных астероидов. Скорости вращения одиночных астероидов взяты из базы данных А. Харриса (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists>), из которой было отобрано 1206 объектов главного пояса, и базы данных по АСЗ Г. Хана (<http://earn.dlr.de/nea>), включающей 175 объектов. Анализ этих данных показал, что скорость вращения одиночных астероидов главного пояса в 1.7 раза меньше, чем у астероидов со спутниками, а для АСЗ эта цифра составляет 3.4. При этом ошибки определения скоростей вращения существенно меньше, чем расхождения средних скоростей вращения у одиночных астероидов и главных тел двойных астероидов. Этот наблюдательный факт дает весомый аргумент в пользу теории Н. Н. Горькавого. Однако пока остается неясным, противоречат ли этому факту другие механизмы образования двойных астероидов?

Таким образом, известно несколько механизмов образования двойных астероидов: классический захват, дробление астероида при столкновении с другим астероидом, распад астероида под действием приливных сил при пролете вблизи большой планеты и, наконец, аккреция пыли, выбитой из астероида микрометеоритами. Пока еще нет оснований отдавать предпочтение какому-нибудь из них. Складывается впечатление, что каждый из этих механизмов может вносить свою лепту, обогащая Солнечную систему двойными астероидами. Вероятно, потребуются дополнительные исследования, чтобы выяснить, какой же из механизмов наиболее производителен и является основным «поставщиком» двойных астероидов.

ДИНАМИКА ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДОВ. УСТОЙЧИВОСТЬ ИХ ДВИЖЕНИЯ

После образования гравитационно связанной пары астероидов она попадает в поле действия целого ряда сил, оказывающих влияние как на движение компонентов пары друг относительно друга, так и на гелиоцентрическое движение пары. К этим силам следует отнести притяжение Солнца, притяжение больших планет, взаимное притяжение компонент, в котором немаловажную роль может играть влияние несферичности их фигур, лучевое давление и особенно эффект Ярковского, сопротивление среды (при наличии газовой или пылевой атмосферы у одного или у обоих компонентов), влияние упругости и пластичности вещества, из которого состоят компоненты.

Наибольшее внимание исследователей было привлечено к изучению эффектов, связанных с возмущающим влиянием Солнца, особенно тех, которые характеризуют долговременные изменения орбиты спутника относительно главного компонента. Поскольку орбитальный период спутника значительно меньше периода гелиоцентрического движения пары, то при исследовании данной задачи весьма эффективны методы усреднения, позволяющие устранять короткопериодические возмущения и изучать долгопериодические и вековые возмущения в движении спутника. После усреднения

уравнений движения большая полуось спутника оказывается постоянной и изменяются другие элементы. Эксцентриситет и наклон орбиты могут изменяться в широких пределах [3, 4, 14, 15]. Особенно важны изменения эксцентриситета: если в результате такого изменения орбита спутника пересечет поверхность главного компонента двойного астероида, то спутник столкнется с главным телом и перестанет существовать; образуется контактный астероид. Если же изменения эксцентриситета ограничены и столкновения спутника с главным телом не происходит, то можно говорить об устойчивости движения спутника по отношению к вековым возмущениям. Ясно, что здесь все зависит от начальных условий движения спутника [3, 14], и можно указать некоторые зоны, где спутник не сталкивается с главным телом, т. е. движение спутника устойчиво. Нередко задача упрощается: масса спутника считается нулевой, а орбита Солнца, в его движении вокруг астероида, — круговой. Тогда это — классическая ограниченная задача трех тел [36], в которой существует интеграл Якоби, и можно построить поверхность нулевых скоростей спутника во вращающейся вместе с Солнцем системе координат. Эту поверхность часто называют поверхностью Хилла. Если эта поверхность имеет изолированную часть, замкнутую вокруг главного компонента, то спутник, находящийся внутри этой части поверхности Хилла, окажется как бы в ловушке и уйти оттуда не сможет. В этом случае говорят об устойчивости движения спутника по Хиллу, в рамках ограниченной задачи трех тел [43].

Известно, что далекие спутники Юпитера и Сатурна имеют обратные движения, тогда как близкие спутники обладают прямым движением. Но чем дальше спутник от планеты, тем больше возмущения от Солнца. Все это наводит на мысль, что вдали от планет обратные движения спутников более устойчивы к возмущениям, чем прямые. Что это действительно так, подтвердили аналитические исследования и численные эксперименты [6, 80, 81]. Вероятно, и у двойных астероидов должен наблюдаться этот эффект: близкие спутники имеют прямое движение, а далекие — обратное. Но к настоящему времени обратные спутники астероидов не найдены.

Возмущения в движении спутника астероида от больших планет могут стать значительными, если двойной астероид сближается с большой планетой. Возможен даже отрыв спутника от главного компонента [6, 58, 109]. Отличия формы компонентов от сферической тоже могут дать заметные возмущения в их взаимном движении, и если хотя бы часть орбиты спутника проходит вблизи поверхности главного компонента, возможно столкновение спутника с последним [6]. Кроме того, взаимные возмущения спутника и главного компонента могут вызвать заметные изменения во вращательном движении компонентов, что повлияет на световые кривые двойного астероида [8].

Эффект Яковского в теории лучевого давления состоит в том, что нагретая солнечными лучами сторона астероида теряет тепло с некоторой временной задержкой, нагретая сторона излучает в инфракрасном диапазоне, но направлено это излучение под некоторым углом к направлению на Солнце. Возникает сила реактивного давления на поверхность астероида от теплового излучения, имеющая составляющую по направлению орбитальной скорости спутника; движение спутника может тормозиться этой силой, а может и ускоряться, в зависимости от направления осевого вращения спутника. Но в любом случае эта сила вызывает вековые изменения большой полуоси спутника, ведущие в конечном счете к разрушению двойного астероида. Действие этого эффекта очень медленное, но если интервал времени сравним со временем существования Солнечной системы, то изменения орбиты спутника могут стать значительными. Наиболее заметно действие эффекта Яковского на тела с небольшими диаметрами порядка нескольких метров [52, 109]. Эффект Яковского хорошо изучен

для одиночных астероидов [109], и доказано, что он играет важную роль в переносе материи из внутренних районов главного пояса астероидов в район внутренних больших планет. Для двойных астероидов подобных исследований пока нет [109].

Сопротивление пылевой среды, окружающей астероид, движению спутника приводит к постепенному уменьшению эксцентриситета и большой полуоси. Эффект этот достаточно мал, если плотность пылевого облака мало отличается от плотности пылевой материи в околоземном космическом пространстве. При более высокой плотности и больших интервалах времени можно ожидать заметных эволюционных эффектов [17]. Они направлены на то, чтобы сблизить спутник с главным компонентом, а форму орбиты сделать круговой. В процессе эволюции уменьшается большая полуось орбиты спутника, а на конечной ее стадии спутник падает на поверхность главного компонента. В данной динамической задаче можно усмотреть аналогию со случаем движения искусственного спутника в разреженной верхней атмосфере Земли.

Нельзя не затронуть еще один источник вековых изменений орбиты спутника астероида; связан он с тем, что вещество астероида не является абсолютно твердым веществом и обладает упругостью и пластичностью. Свойство пластичности заключается в том, что под действием сил вещество изменяет форму своей поверхности (деформируется), а после прекращения действия сил прежняя форма не восстанавливается. Известно, что запаздывание приливов в теле Земли, вызываемое пластичностью земного вещества, вызывает силу, стремящуюся ускорить движение Луны и замедлить вращение Земли. При этом увеличивается радиус лунной орбиты и замедляется движение Луны по орбите. Аналогичные эффекты должны действовать и в системе двойного астероида: из-за запаздывания приливов, вызываемых притяжением спутника в теле главного компонента, будет увеличиваться большая полуось орбиты спутника и тормозиться вращение главного тела. Изменения этого рода будут очень медленными, но с течением времени может накопиться заметный эффект. Отметим, что в работе [104] пересмотрена оценка параметров пластичности вещества астероидов. Это должно привести к сокращению времени, требующегося на накопление заметных изменений орбитального движения спутника астероида и вращения главного тела. Расчеты таких изменений для двойных астероидов пока не делались, но оценки изменений вращения одиночного астероида с новыми значениями параметров пластичности проведены [104]. Они очень заметно сокращают время стабилизации вращения одиночного астероида под действием деформаций его фигуры, вызываемых центробежной силой.

Возмущенное гелиоцентрическое движение астероидов и создание условий для образования двойных астероидов. Орбиты астероидов изменяются под действием многочисленных возмущений, вызываемых главным образом притяжением Солнца. В этих изменениях есть короткопериодическая составляющая, не приводящая к существенному изменению орбит, но есть также и долгопериодическая и вековая составляющие. Последние могут произвести серьезные эволюционные изменения орбит, сблизить орбиту одного астероида с орбитой другого или же с орбитой большой планеты или, наконец, перебросить астероид в зону хаотического движения вблизи мощного резонанса. Этим обеспечиваются условия для образования двойного астероида одним из описанных выше механизмов.

Можно отметить два основных типа эволюции гелиоцентрических орбит: эволюция под действием вековых возмущений и резонансная эволюция, связанная с попаданием астероида в резонансную зону или находящуюся на ее периферии зону хаотических движений. Оба эти типа эволюции могут существенно изменять элементы орбит. Особенно важны изменения эксцентриситета, так как они способствуют сближению астероида с большой

планетой, при котором астероид перебрасывается на принципиально другую орбиту, например из главного пояса астероидов на орбиту, пересекающуюся с орбитой Земли, с существенно другой большой полуосью. Образование АСЗ, в частности астероидов групп Амура и Аполлона, в настоящее время объясняют именно таким процессом эволюции орбит астероидов главного пояса [17, 114].

Завершая данный раздел, можно сказать: накопившиеся за последние годы результаты исследований показывают, что двойные астероиды — естественный продукт динамических процессов, происходящих в кольце астероидов. Таких процессов может быть несколько, и в настоящее время нет возможности указать, какой из них играет доминирующую роль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Солнечной системе в течение последнего десятилетия обнаружена популяция астероидов со спутниками. В обзоре представлены характеристики спутниковых систем астероидов, обнаруженных в главном поясе, среди астероидов, сближающихся с Землей и объектов, находящихся в поясе Койпера. В каждой из этих трех областей параметры спутниковых систем имеют общие черты.

Приведенные данные позволяют сделать приблизительную оценку процентного числа астероидов, имеющих спутники. Для этого надо учесть селекцию наблюдений, поскольку для открытия сложной структуры астероида нужны как минимум его достаточно подробные исследования.

В главном поясе астероидов только около 1500 объектов исследованы фотометрическими методами, а спутники обнаружены всего у 23 астероидов, что составляет около 1.5 %. Среди астероидов, сближающихся с Землей, исследовано с помощью радаров и фотометрии около 550 объектов, а спутники обнаружены у 27 астероидов, что составляет около 5 %. Среди транснептуновых объектов найдено около 1000 астероидов, а число известных двойных составляет 13, что соответствует 1.3 %.

Сделав поправку на трудность изучения далеких объектов, можно считать, что процентный состав астероидов, имеющих спутники, составляет не менее 5 %. Это, по-видимому, нижняя граница оценки процентного содержания двойных астероидов. Если учесть астероиды, заподозренные в двойственности, то процентный состав астероидов, имеющих спутники, увеличится раза в три и достигнет 15 %. Можем надеяться, что увеличение числа подробно исследованных астероидов в ближайшее время позволит уточнить процентный состав популяции астероидов со спутниками.

Сейчас известно несколько механизмов образования двойных астероидов, кратко рассмотренных в обзоре. Возможно, каждый из них имеет место, но оценить преимущества какого либо из них, по-видимому, можно будет сделать в ближайшем будущем.

Отметим, что сейчас активно обсуждается возможность столкновения Земли с небесным телом, которое может стать катастрофическим для человечества. В планах разработки средств защиты Земли от опасного астероида обсуждается возможность космической миссии с доставкой на астероид ядерного заряда для последующего взрыва [34, 38]. Рассчитать орбиту одиночного астероида с большой точностью намного проще, чем орбиту астероида со спутником. Поэтому исследование двойных астероидов имеет большое значение для методологии создания средств защиты Земли от столкновения с такими объектами.

1. *Абраменко А. Н., Агапов Е. С., Анисимов В. Ф. и др.* Телевизионная астрономия / Под ред. В. Б. Никонова. — М.: Наука, 1984.—272 с.
2. *Балега И. И., Балега Ю. Ю.* Цифровая спекл-интерферометрия 72 двойных звезд // Письма в Астрон. журн.—1985.—11, № 2.—С. 112.

3. *Вашковьяк М. А.* О специальных частных решениях двукратно осредненной задачи Хилла с учетом сжатия центральной планеты // Письма в Астрон. журн.—1996.—2, № 22.—С. 231—240.
4. *Вашковьяк М. А.* Некоторые небесно-механические особенности системы спутников Урана // Письма в Астрон. журн.—2001.—27, № 7.—С. 543—548.
5. *Горькавий Н. Н., Фридман А. М.* Физика планетных колец: Небесная механика сплошной среды. — М.: Наука, 1994.—348 с.
6. *Железнов Н. Б.* Численное интегрирование уравнений поступательно-вращательного движения двойного астероида // Тр. Ин-та прикладной астрономии.—1999.—Вып. 4.—С. 272—290.
7. *Железнов Н. Б.* Исследование двойного астероида 1996 FG3 // Сообщ. Ин-та прикладной астрономии РАН.—2002.—№ 147.—С. 31.
8. *Железнов Н. Б.* Двойные астероиды // Тр. Ин-та прикладной астрономии.—2004.—Вып. 11.—С. 206—224.
9. *Зайцев А. Л., Кривцов А. П., Шубин В. А.* Интерференция радиолокационного эха от двойного астероида 4179 Toutatis // Физика Луны и планет: Абстракты конф., посвященной 100-летию со дня рождения акад. Н. П. Барабашова. — Харьков: Астрон. обсерватория Харьков. ун-та, 1994.—С. 142.
10. *Зайцев А. Л., Сокольский А. Г., Ржига О. Н. и др.* Радиолокационные исследования астероида 4179 Тютатис // Радиотехника и электроника.—1993.—38, № 10.—С. 1842—1850.
11. *Замарашкина М. Д.* Вероятная эволюция орбиты кометы Шумейкеров-Леви 9 // Тр. Ин-та прикладной астрономии.—2004.—Вып. 11.—С. 124—135.
12. *Карачкина Л. Г., Прокофьева В. В., Гафтонюк Н. М.* О вынужденной прецессии астероида 87 Сильвия // Астрон. вестник.—1999.—33, № 1.—С. 55—66.
13. *Карачкина Л. Г., Прокофьева В. В., Таращук В. П.* Исследование модуляций блеска астероида 1620 Географ // Астрон. вестник.—1998.—32, № 4.—С. 327—339.
14. *Лидов М. Л.* Эволюция орбит искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений внешних тел // Наблюд. искусств. спутников Земли.—1961.—Вып. 8.—С. 5—45.
15. *Лидов М. Л., Ярская М. В.* Интегрируемые случаи в задаче об эволюции орбиты спутника при совместном влиянии внешнего тела и нецентрального поля планеты // Космич. исследования.—1974.—12, вып. 2.—С. 155—170.
16. *Лушичко Д. Ф.* Физические свойства астероидов // Вісник Астрон. школи.—2000.—1, № 2.—С. 63—77.
17. *Мерман Г. А.* О достаточных условиях захвата в задаче трех тел // Докл. АН СССР.—1954.—99, № 6.—С. 325—327.
18. *Прокофьева В. В.* О возможной двойственности астероида 87 Сильвия // Comet. циркуляр.—1992.—№ 426.—С. 13.
19. *Прокофьева В. В.* Исследования двойственности астероидов в Крымской астрофизической обсерватории // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1995.—90.—С. 93—96.
20. *Прокофьева В. В., Бочков В. В., Павленко Е. П.* Искусственный фотометрический стандарт на светодиодах как основа для фундаментальной телевизионной звездной фотометрии // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1993.—88.—С. 110—119.
21. *Прокофьева В. В., Гафтонюк Н. М., Таращук В. П.* Три периода в изменениях блеска астероида 4197 // Астрон. вестник.—2001.—35, № 5.—С. 422—428.
22. *Прокофьева В. В., Демчик М. И.* Астероид 87 Сильвия — двойной // Астрон. циркуляр.—1992.—№ 1552.—С. 27—28.
23. *Прокофьева В. В., Демчик М. И.* Частотный анализ одновременных BVR-наблюдений астероида 87 Sylvia и его двойственность // Письма в Астрон. журн.—1994.—20, № 4.—С. 299—307.
24. *Прокофьева В. В., Демчик М. И., Карачкина Л. Г., Гафтонюк Н. М.* Фотометрические наблюдения астероида 87 Сильвия в Крымской астрофизической обсерватории в 1989 и 1992—1993 гг. и их частотный анализ // Астрон. вестник.—1999.—33, № 3.—С. 231—243.
25. *Прокофьева В. В., Демчик М. И., Карачкина Л. Г., Павленко Е. П.* Фотометрия и колориметрия астероидов на цифровом телевизионном комплексе КрАО // Астрон. вестник.—1992.—26, № 5.—С. 3—14.
26. *Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г.* Фотометрические периоды в изменении блеска астероида 423 Диотима // Физика Луны и планет: Абстракты конф., посвященной 100-летию со дня рождения акад. М. П. Барабашова. — Харьков: Астрон. обсерватория Харьков. ун-та, 1994.—С. 103.
27. *Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г., Гафтонюк Н. М.* Астероид 87 Сильвия — сложная спутниковая система // Околосветная астрономия XXI века. — Звенигород, 2001.—С. 252—257.
28. *Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г., Таращук В. П.* Исследование колебаний блеска астероида 1620 Географ в его сближении с Землей в 1994 г. // Астрон. вестник.—1997.—23, № 11.—С. 870—880.

29. Прокофьева В. В., Таращук В. П. Развитие представлений о двойственности астероидов // Астрон. вестник.—1995.—29, № 2.—С. 123—134.
30. Прокофьева В. В., Таращук В. П., Горькавый Н. Н. Спутники астероидов // Успехи физ. наук.—1995.—165, № 6.—С. 661—689.
31. Прокофьева В. В., Таращук В. П., Круглый Ю. Н. и др. Анализ колебаний блеска астероида 4179 Тоутатис // Письма в Астрон. журн.—1994.—21, № 1.—С. 66—79.
32. Рябова Г. О. О возможных связях между особыми малыми планетами и метеорными роями // Астрономия и геодезия.—1986.—Вып. 14.—С. 59.—66.
33. Рябова Г. О. Астероид 1620 Географ. II. Метеорные потоки астероида // Астрон. вестник.—2002.—36, № 3.—С. 254—268.
34. Симоненко В. А., Петров Е. Н., Родионов В. В. К технологии ядерного воздействия на опасные космические объекты // Междунар. конф. «Космическая защита Земли», 11—15 сент. 2000, Евпатория. — Евпатория, 2000.—С. 74
35. Страйжис В. Многоцветная фотометрия звезд. — Вильнюс: Моклас, 1977.—310 с.
36. Субботин М. Ф. Курс небесной механики. — Л.-М.: Гостехиздат, 1937.—Т. 2.—404 с.
37. Субботин М. Ф. Курс небесной механики. — М.-Л.: ГИТТЛ, 1949.— Т. 3.—280 с.
38. Сысоев В. М., Веселков Л. П., Усцелемов А. А. Космическая защита Земли: требования к взрывным ядерным устройствам и возможности их обеспечения // Междунар. конф. «Космическая защита Земли», 11—15 сент. 2000, Евпатория. — Евпатория, 2000.—С. 73.
39. Теребиж В. Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. — М.: Наука, 1992.—290 с.
40. Уральская В. С. Классификация малых тел в Солнечной системе // Сборник трудов конференции / Под ред. Л. В. Рыхлова, М. А. Смирнов, С. И. Барабанов и др. — С.-Петербург, 2003.—Т. 1.—С. 38—54.
41. Хильми Г. Ф. О возможности захвата в задаче трех тел // Докл. АН СССР.—1948.—62, № 1.—С. 39—42.
42. Хильми Г. Ф. Проблема N тел в небесной механике и космогонии. — М.: Изд-во АН СССР, 1951.—150 с.
43. Чеботарев Г. А. Гравитационная сфера Хилла и устойчивость спутниковых орбит // Бюл. Ин-та теор. астрономии.—1968.—11, № 6.—С. 341—365.
44. Шмидт О. Ю. Возникновение планет и их спутников // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1950.—№ 1.—С. 29—45.
45. Arlot J. E., Lecacheux J., Richardson Ch., et al. A possible satellite of 146 Lucina // Icarus.—1985.—61.—P. 224—231.
46. Belton M. J. S., Chapman C. R., Veverka J. First Images of Asteroid 243 Ida // Science—1994.—265.—P. 1543—1547.
47. Binzel R. P. The further support for minor planet multiplicity // Occul. Newsl.—1978.—P. 152—153.
48. Binzel R. P. Is 1220 Crocus a precessing, binary asteroid? // Icarus.—1985.—63.—P. 99—108.
49. Binzel R. P., Farinella P., Zappala V., Cellino A. Asteroid rotation rates — Distributions and statistics // Asteroids II / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. Sh. Matthews. — Tucson: Arizona Univ. press, 1989.—P. 416—441.
50. Binzel R. P., Lupishko D. F., Di Martino M., et al. Physical properties of Near-Earth objects // Asteroids III / Eds W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — Tucson: Arizona Univ. press, 2002.—P. 255—271.
51. Binzel R. P., van Flandern T. C. Minor planets: The discovery of minor satellites // Science.—1978.—203.—P. 903—905.
52. Bottke W. F. Jr., Vokroulicky D., Rubincam D. P., et al. The effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids // Asteroids III / Eds W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — Tucson: Arizona Univ. press, 2002.—P. 395—408.
53. Burns J. A., Safronov V. S. Asteroids nutation angles // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1973.—165.—P. 403—411.
54. Cappaccioni E., Cerroni P., Coradini M., et al. Shapes of asteroids compared with fragments from hypervelocity impact experiments // Nature.—1984.—308.—P. 832—834.
55. Catullo V., Zappala V., Farinella P., et al. Analysis of the shape distribution of asteroids // Astron. and Astrophys.—1984.—138.—P. 465—468.
56. Cellino A., Pannunzio A., Zappala V., et al. Do we observe light curves of binary asteroids? // Astron. and Astrophys.—1985.—144.—P. 355—362.
57. Chauvineau B., Mignard F., Farinella P. The lifetime of binary asteroid VS gravitational encounters and collisions // Icarus.—1991.—94.—P. 299—310.
58. Chazy J. Sur l'allure de mouvement dans le probleme de trois corps quand le temps croit indefiniment. — Paris, Gauthier-Villars et C-ie, 1922.—P. 101.
59. Chernetenko Yu. A., Medvedev Yu. D. Estimate of Shoemaker-Levy 9 nucleus size from positions observations // Planet. and Space Sci.—1994.—42, N 1.—P. 95—96.
60. Davis D. R., Chapman C. R., Greenberg R. L., et al. Collisional Evolution of Asteroids Populations, Rotations and Velocities // Asteroids / Ed. T. Gehrels. — Tucson: Arizona Univ. press, 1979.—P. 528—557.
61. Drummond J. D., Hege E. K. Speckle interferometry of asteroids // Asteroids II / Eds

- R. P. Binzel, T. Gehrels, M. Sh. Matthews. — Tucson: Arizona Univ. press, 1989.—P. 171—191.
62. *Dunham D. W.* Occultation of stars by minor planets // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1978.—9.—P. 621.
 63. *Dunlap J. L., Gehrels T.* Minor Planets III. Lightcurves of a Trojan asteroid // *Astron. J.*—1969.—74.—P. 796—803.
 64. *Durda D. D.* Numerical models of the origin of asteroidal moons during Hirayama family formation // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1994.—26, N 3.—P. 1025—1214.
 65. *Durda D. D.* The formation of asteroid satellites in catastrophic collisions // *Icarus.*—1996.—120.—P. 212—219.
 66. *Durda D. D., Greenberg R., Jedicka R.* Collisional models and scaling laws: a new interpretation of the shape of the main belt asteroid size distribution // *Icarus.*—1998.—135.—P. 431—440.
 67. *Efroimsky M., Lazarian A.* Inelastic dissipation in wobbling asteroids and comets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—311.—P. 269—278.
 68. *Farinella P., Chauvineau B.* On the evolution of binary Earth approaching asteroids // *Astron. and Astrophys.*—1993.—279.—P. 251—259.
 69. *Farinella P., Paolicchi P., Tedesco E. F., Zappala V.* Triaxial Equilibrium Ellipsoids among the Asteroids // *Icarus.*—1981.—46.—P. 114—123.
 70. *Farinella P., Paolicchi P., Zappala V.* The asteroids as Outcomes of Catastrophic Collisions // *Icarus.*—1982.—52.—P. 409.
 71. *Flandern T. C., Tedesco E. F., Binzel R. P.* Satellites of Asteroids // *Asteroids* / Ed. T. Gehrels. — Tucson: Arizona Univ. press, 1979.—P. 443—465.
 72. *Fridman A. M., Gorkavyi N. N.* Physics of planetary rings. — Heidelberg: Springer, 1999.—P. 222—233.
 73. *Gaftonyuk N., Gorkavyi N.* The origin and rotation of binary asteroids // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2005.—№ 5—P. 483—486.
 74. *Gorkavy N. N.* The new model of the origin of the Moon. 35-th Meeting of the AAS division on dynamical astronomy // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—2004.—36.—P. 2.
 75. *Harris A. W.* Tumbling asteroids // *Icarus.*—1994.—107.—P. 209—211.
 76. *Hartmen W. K.* Diverse puzzling and a possible unified explanation // *Asteroids* / Ed. T. Gehrels. — Tucson: Arizona Univ. press, 1979.—P. 446—479.
 77. *Hege E. K., Cocks W. G., Hubbard E. N., et al.* Possible secondaries of asteroid found by speckle interferometry // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1980.—12.—P. 662.
 78. *Hirayama K.* Families of asteroids // *Jap. J. Astron. Geophys.*—1923.—N 1.—P. 55—93.
 79. *Hirayama K.* Families of asteroids. Second paper // *Jap. J. Astron. Geophys.*—1928.—N 5.—P. 137—162.
 80. *Hunter R. B.* Motions of satellites and asteroids under the influence of Jupiter and Sun. 1. Stable and unstable orbits // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1967.—136.—P. 345—365.
 81. *Innanen K. A.* The Coriolis asymmetry in the classical 3-body problem and Jacobian // *Astron. J.*—1980.—85.—P. 81—86.
 82. *Jopek T. J., Valsecchi G. B., Froeschle Cl.* Possible meteoroid streams associated with (69230) Hermes and 2002 SY50 // *Conf. "Meteoroids 2004": Abstr.*—(<http://aquarid.physics.uwo.ca/meteoroids2004/>).
 83. *Knezevic Z.* Asteroid proper elements: Past and present // *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*—1994.—63.—P. 129—139.—(Seventy-Five Years of Hirayama Asteroid Families: The Role of Collisions in the Solar System History / Eds Y. Kozai, R. P. Binzel, T. Hirayama).
 84. *Knezevic Z.* The Determination of Asteroid Proper Elements // *Asteroids III* / Eds W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — Tucson: Arizona Univ. press, 2002.—P. 603—612.
 85. *Lagerkwist C.-L., Harris A. W., Zappala V.* Asteroid lightcurve parameters // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. Sh. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona press, 1989.—P. 1162—1179.
 86. *Leone G., Farinella P., Paolicchi P., Zappala V.* Equilibrium model of binary asteroids // *Astron. and Astrophys.*—1984.—140.—P. 265—272.
 87. *Magnusson P.* Pole determinations of asteroids // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. Sh. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona press, 1989.—P. 1180—1190.
 88. *Magnusson P., Lagerkwist C.-L.* Analysis of asteroid lightcurves. Data base and basic reduction // *Astron. and Astroph. Suppl. Ser.*—1990.—86.—P. 45—51.
 89. *Merline W. J., Close L. M., Dumas C., et al.* Discovery of Asteroidal Satellite. S/1998 (45) 1 // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1999.31.—(DPS meeting #31, #20.06).
 90. *Merline W. J., Close L. M., Dumas C., et al.* Discovery of Companions to Asteroids 762 Pulcova and 90 Antiope by Direct Imaging // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—2000.—32.—P. 1017.
 91. *Millis R. Z., Elliot J. L.* Direct determination of asteroid // *Asteroids* / Ed. T. Gehrels. — Tucson: Arizona Univ. press, 1979.—P. 98—118.
 92. *Oberst J., Motola S., Di Martino M., et al.* A model for rotating and shape of asteroid 9969 Braille from ground-based observations and images obtained during the Deep Space 1 (DS1) flyby // *Icarus.*—2001.—153.—P. 16—23.
 93. *Ostro S. J.* Radar observation of asteroids // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. Sh. Matthews. — Tucson: Arizona Univ. press, 1989.—P. 192—272.

94. *Ostro S. J.* Planetary radar astronomy // *Rew. Mod. Phys.*—1993.—**65**, N 4.—P. 1235—1279.
95. *Ostro S. J.* Questions and answers // *Planet. Report.*—1993.—**13**, N 2.—P. 28.
96. *Ostro S. J., Campbell D. B., Hine A. A., et al.* Radar Images of asteroid 1627 Ivar // *Astron J.*—1990.—**99**.—P. 2012—2018.
97. *Ostro S. J., Campbell D. B., Shapiro I. I.* Radar Detection of 12 Asteroids from Arecibo // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1986.—**18**, N 3.—P. 796.
98. *Ostro S. J., Chandler J. F., Hine A. A., et al.* Radar Images of Asteroid 1989 PB // *Science.*—1990.—**248**.—P. 1523—1528.
99. *Ostro S. J., Connelly R., Belkora Z.* Asteroid shapes from radar echo spectra: A new theoretical approach // *Icarus.*—1988.—**73**.—P. 15—24.
100. *Ostro S. J., Jurgens R. F., Rosema K. D., et al.* Radar imaging of Asteroid 4179 Toutatis // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1993.—**25**.—P. 1126.
101. *Ostro S. J., Jurgens R. F., Rosema K. D., et al.* Radar observations of asteroid 1620 Geographos // *Icarus.*—1996.—**121**.—P. 46—66.
102. *Ostro S. J., Rosema K. D., Jurgens R. F.* The shape of Eros // *Icarus.*—1990.—**84**.—P. 334—351.
103. *Paolicchi P., Burns J. A., Weidenschilling S. J.* Side Effects of Collision: Spin Rate Changes, Tumbling, Rotation States and Binary Asteroids // *Asteroids III* / Eds W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — Tucson: Arizona Univ. press, 2002.—P. 517—526.
104. *Petit J.-M., Lemaître A.* Resonance and capture probability in the Ida/Dactyl System // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1997.—**29**.—P. 972.
105. *Pravec P., Sarounova L., Hicks M. D.* Two Periods of 1999 HF₁—Another Binary NEA Candidate // *Icarus.*—2002.—**158**.—P. 276—280.
106. *Pravec P., Sarounova L., Rabinowitz D. L., et al.* Two-Period Lightcurves of 1996 FG₃, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: One Probable and Two Possible Binary Asteroids // *Icarus.*—2000.—**146**, N 1.—P. 190—203.
107. *Prokof'eva V. V., Demchik M. I., Karachkina L. G.* Photometric evidences the binary asteroids for 87 Sylvia and 423 Diotima // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—1995.—**8**.—P. 291—296.
108. *Prokof'eva V. V., Tarashchuk V. P., Karachkina L. G.* The precession of asteroid 1620 Geographos // *Odessa Astron. Publ.*—1996.—**9**.—P. 117—118.
109. *Richardson D. C., Leinhardt Z. M., Melosh H. J., et al.* Gravitation aggregates: Evidence and Evolution // *Asteroids III* / Eds W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — Tucson: Arizona Univ. press, 2002.—P. 501—515.
110. *Sheppard S. S., Jewitt D.* A Contact Binary in the Kuiper Belt? // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—2004.—**36**, N 4.
111. *Sichao W., Yuezhen Wu., Mengxian B., et al.* A possible Satellite of 9 Metis // *Icarus.*—1981.—**46**.—P. 285—287.
112. *Spencer J. R., Akimov, L. A., Angeli C., et al.* The Lightcurve of 4179 Toutatis: Evidence for Complex Rotation // *Icarus.*—1995.—**117**, N 1.—P. 71—89.
113. *Tedesco E. F.* Binary asteroids: Evidence for their existence from lightcurves // *Science.*—1979.—**203**.—P. 905—907.
114. *Van Flandern T. C., Tedesco E. F., Binzel R. P.* Satellites of Asteroids // *Asteroids* / Ed. T. Gehrels. — Tucson: Arizona Univ. press, 1979.—P. 443—465.
115. *Veillet C., Doressoundiram A., Shapiro J., et al.* 1998 WW31 // *Minor Planet. Electron. Circ.*—2001.—G29.
116. *Warner B. D., Pravec P., Harris A. W.* A new binary asteroid—9069 Hovland // *Minor Planet Mailing List (MPML).*—2004.—13545.—(<http://groups.yahoo.com/group/mpml/message/13545>).
117. *Weidenschilling S. J.* Hector: Nature and Origin of a binary asteroids // *Icarus.*—1980.—**44**.—P. 807—809.
118. *Zaitsev A. L.* Interference of radar echo from the binary asteroid 4179 Toutatis // *Abstracts* / Ed. H. van Woerden. — Netherlands, Sliedrecht: Twin press, 1994.—P. 269.

Поступила в редакцию 07.07.05