

УДК 523.44

ИССЛЕДОВАНИЯ АСТЕРОИДОВ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2005 г. В. Г. Шевченко*, Р. А. Мохамед**

*Научно-исследовательский институт астрономии Харьковского национального университета, Украина

**Факультет естественных наук, кафедра физики и астрономии Гаринойского университета,
Бенгази, Ливия

Поступила в редакцию 12.02.2004 г.

Представлен обзор прошедших, осуществляемых в настоящее время и планируемых программ по исследованию астероидов с помощью космических аппаратов. Приведены основные результаты, которые были получены по наблюдениям со спутников, находившихся на околоземной орбите (OAO-2, IUE, FIRSSE, IRAS, HST, Hipparchos, ISO, MSX.), и аппаратов, отправленных к конкретным объектам (Galileo, NEAR, DS1, Stardust). Рассмотрены будущие космические миссии (MUSES-C, Rozetta, DOWN, и др.), их основные цели и задачи по изучению астероидов. Обсуждается целесообразность исследования малых тел с помощью космических аппаратов.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то что наземные наблюдения еще долгое время будут основными в исследовании астероидов, прежде всего вследствие их долговременности и незначительных финансовых расходов, в последнее время все больше и больше данных о физических, химических, минералогических и морфологических свойствах этих тел получают с помощью космических аппаратов (КА). Особенно это стало заметно в последнее десятилетие прошлого и в начале этого века. Интерес к исследованию пояса астероидов вызван не только с точки зрения решения фундаментальных задач (происхождение малых тел, их роль в формировании Солнечной системы, связь между астероидами, кометами и метеорами и др.), но и с точки зрения решения чисто прикладных задач (астероидно-кометная опасность, источники внеземных минеральных ресурсов, будущие космические базы и др.). Тем более что прикладные вопросы необходимо решать уже сегодня. В связи с этим изменяются и направления в исследовании малых тел Солнечной системы с помощью КА (наблюдения с околоземной орбиты или запуск КА к конкретным выбранным объектам). При запуске КА к объектам предполагается всестороннее изучение одного или двух–трех объектов (например, миссии Galileo и NEAR), при исследовании с околоземной орбиты – наблюдения нескольких сотен, а то и тысяч объектов (например, ИСЗ IUE, IRAS и MSX).

В предлагаемом обзоре рассмотрены задачи, которые решались в рамках уже завершенных космических миссий и задачи, которые будут выполнены в недалеком будущем. Эти миссии выполнялись Американским, Европейским и другими космическими агентствами и/или в тесном со-

трудничестве между ними. В таблице представлены перечень КА, на которых проводились исследования астероидов, даты запуска КА, диапазоны длин волн и основные результаты.

НАБЛЮДЕНИЯ С ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЫ

Первые космические наблюдения астероидов были выполнены в 1971 г. с борта американского КА OAO-2 (Orbital Astronomical Observatory 2) (Calladwel, 1975). Спутник был выведен на орбиту в декабре 1968 г. и имел на борту приемную аппаратуру, работающую в УФ-диапазоне. Были проведены наблюдения только трех крупнейших астероидов (1 Церера, 2 Паллада и 4 Веста) для изучения отражательной способности их поверхностей в четырех спектральных полосах с центрами у 2590, 3075, 3360 и 4300 Å. По результатам наблюдений удалось определить альбедо этих астероидов в данных спектральных полосах, а также установить, что их отражательная способность увеличивается линейно с длиной волны.

Позже наблюдения астероидов из космоса были продолжены также в УФ-диапазоне спектра на ИСЗ IUE (International Ultraviolet Explorer), который был выведен на околоземную орбиту в январе 1978 г. На ИСЗ был установлен 45-см телескоп со спектрографами, которые перекрывали диапазон длин волн 1700–3250 Å с разрешающей способностью 2–3 Å. В течение 18 лет работы этого ИСЗ (прекратил работу в конце 1996 г., Stickland, 1996) были получены спектры более чем 100 астероидов (Veeder и др., 1980; Butteworth, Meadows, 1985; Festou и др., 1991; A'Hearn, Feldman, 1992; Brosh, 1995 и др.). Проводились наблюдения не

Космические аппараты, на которых проводились исследования астероидов

Название КА	Дата запуска	Диапазон длин волн, мкм	Основные результаты
OAO-2	20.12.1968	0.2–0.45	Определены УФ-альбедо трех астероидов
IUE	26.01.1978	0.17–0.325	Определены УФ-альбедо 48 астероидов, получена УФ-кривая блеска 4 Весты
FIRSSE	23.01.1982	20, 27, 85	Измерены потоки на данных длинах волн, уточнены тепловые модели астероидов
IRAS	26.01.1983	12, 25, 60, 100	Определены альбедо и диаметры 2228 астероидов
HIPPARCOS	18.08.1989	0.55	Уточнены орбиты избранных астероидов
GALILEO	18.09.1989	0.4–1.1	Определены альбедо, размеры, формы, координаты осей вращения Гаспры и Иды. Открыт спутник Иды
HST	25.04.1990	0.16–1.2	Определены альбедо и размеры некоторых астероидов, получены детальные изображения Цереры и Весты
ISO	17.11.1995	2.5–240	Измерены потоки в дальнем ИК-диапазоне, сделаны оценки тепловой инерции астероидов
MSX	24.04.1996	0.1–10.8	Измерены потоки в широком диапазоне длин волн, получены альбедо и диаметры 168 астероидов
NEAR	17.02.1996	0.3–1.2	Определены альбедо, размеры, формы, координаты полюсов, плотности Матильды и Эроса. Осуществлена посадка КА поверхность Эроса
DS1	23.10.1998		Определены размер и альбедо астероида Брайле
STARDUST	07.02.1999	0.4–0.9	Определены альбедо, размер, форма астероида Аннефранк

только крупнейших астероидов (например, 1 Церера, 2 Паллада, 3 Юнона и 4 Веста), но и астероидов, сближающихся с орбитой Земли (1566 Икар, 2201 Ольято, 4015 Вильсона–Харрингтона и 4179 Тоутатис), диаметры которых составляют 2–4 км. Для астероида 4 Веста удалось получить кривые блеска в двух участках спектра 2627–2747 Å и 2881–3020 Å, которые охватывали весь период вращения вокруг оси (Festou и др., 1991). Кривые блеска имели один максимум и один минимум на периоде вращения (как и в видимом участке спектра) и амплитуду 0.10 зв. величины, что является подтверждением наличия альбедных пятен на поверхности Весты.

Roettger, Buratti (1994) определили альбедо 45 астероидов различных композиционных типов на длинах волн с центрами 2450, 2670, 2950 и 3150 Å. Оказалось, что, в отличие от видимого участка спектра, среднее значение альбедо в этих участках для астероидов М-типа (металлические) немного выше чем у S-типа (силикатные), т.е. отражательная способность М-астероидов возрастает с длиной волны медленнее.

23 января 1982 г. с борта КА FIRSSE (Far Infrared Sky Survey Experiment) были проведены наблюдения 20 астероидов главного пояса в ИК-диапазоне (Levan, Price, 1984). Тепловое излучение этих астероидов в полосах с центрами 20 и 27 мкм удовлетворяло модели “серого” тела, но на 85 мкм измеренные потоки были в 2–3 раза меньше, чем

дает экстраполяция по закону Планка. Эти данные были позднее использованы для создания более достоверной теплофизической модели астероидов.

Следующим ИСЗ, на котором проводились ИК-наблюдения астероидов, был IRAS (Infrared Astronomical Satellite). ИСЗ работал на орбите с 25 января по 28 ноября 1983 г. на длинах волн с центрами 12, 25, 60 и 100 мкм (Bender, Tedesco, 1986; Matson, Tedesco, 1992). За время своей работы ИСЗ передал данные для 3318 астероидов, которые имеют постоянные номера и для 135 не имеющих номера астероидов. После обработки такого значительного массива данных были определены значения диаметров и альбедо для 2228 астероидов (Tedesco и др., 2002a). На рис. 1 представлена гистограмма распределения астероидов по альбедо, полученным по данным этого ИСЗ. Как видно из рисунка, максимум распределения приходится на низкоальбедные астероиды. На сегодняшний день это наибольший массив данных по альбедо и диаметрам астероидов, он на порядок отличается от наземных определений. И хотя эти данные имеют систематические ошибки (Lupishko, 1998) вследствие неудачного выбора тепловой модели астероида и не вполне корректного использования абсолютной звездной величины, они еще долгое время будут использоваться как основные физические данные астероидов.

Проанализировав данные ИСЗ IRAS, Gaffey (1989) сделал попытку оценить содержание металла на поверхностях S-астероидов по отношению потоков излучения 12/25 мкм. Он показал, что S- и M-астероиды имеют систематически большее отношение потоков, чем астероиды других композиционных типов. У S-астероидов диапазон значений этих отношений такой же, как и у M-типа. Таким образом, из анализа только этих потоков невозможно установить чисто “металлические” астероиды и необходимы дополнительные данные в других диапазонах длин волн.

Наблюдения астероидов для уточнения их орбит и проверки методов определения орбит проводились астрометрическим ИСЗ Hipparcos. Удалось получить астрометрические положения для 48 астероидов с точностью не хуже $0.01''$ – $0.02''$ (Hestroffen, Morando, 1995). Оказалось, что при таких точностях определения положений астероидов возникает необходимость учитывать смещение видимого фотоцентра относительно геометрического, если наблюдения проводятся на фазовом угле, отличном от нуля (Lupishko и др., 2002).

Широкомасштабные наблюдения астероидов проводятся на ИСЗ HST (Hubble Space Telescope). Этот телескоп выведен на околоземную орбиту 24 апреля 1990 г. И хотя главная цель данного телескопа – наблюдение далеких астрофизических объектов, он успешно используется также для исследования объектов Солнечной системы. Так, с помощью ИСЗ HST были проведены наблюдения 12 крупнейших астероидов (Storrs и др., 1994) для выявления у них возможных спутников. У тех астероидов, для которых удалось получить изображения и разрешить диск, спутников не обнаружено. Были получены изображения астероида 1 Церера с высоким угловым разрешением в полосах с центрами 1621, 2795 и 3636 Å и построена карта распределения альbedo по поверхности (Landis и др., 1998; Parker и др., 2002). На поверхности Цереры, возле центрального меридиана, выявлено крупное образование, по-видимому, кратер, который имеет диаметр около 250 км (назван Piazzi). Определено альbedo в данных трех полосах, которое оказалось равно: 0.090, 0.029 и 0.056 соответственно.

Детальные наблюдения были проведены также астероида 4 Веста в оппозиции 1994 и 1996 гг. (Binzel и др., 1997; Thomas и др., 1997; Zellner и др., 1997). На изображениях 1994 г. Веста выглядит объектом неправильной формы и имеет большое альбедное пятно на поверхности диаметром около 200 км, которое получило название Olbers. Контраст между пятном и основной поверхностью Весты достигает 20%. Период обращения астероида вокруг своей оси равняется 5.34 ч, что подтверждает результаты наземных наблюдений. Уточнены также размеры данного астероида (по-

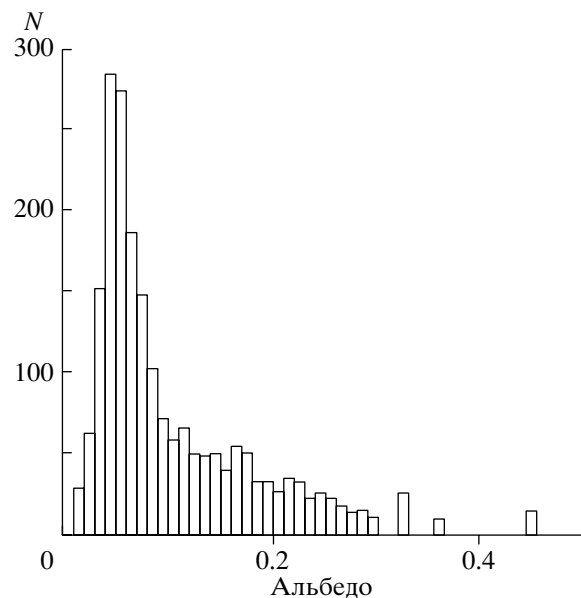


Рис. 1. Гистограмма распределения астероидов по альбедо (построенная по данным Tedesco и др., 2002).

луоси аппроксимирующего эллипсоида составляют $280 \times 272 \times 227$ км) и сделана оценка средней плотности, которая равняется 3.8 ± 0.6 г см⁻³. Построены карты распределения альbedo и цвета по поверхности Весты, по которым выявлено 19 градаций минералогических образований. Допускается, что западная полусфера сложена пироксеном, обогащенным железом и кальцием. По наблюдениям ИСЗ HST в 1996 г. (см. рис. 2), когда Веста была ближе всего к Земле, удалось разрешить детали ландшафта, в том числе гигантский кратер в приполярной области Весты, который имеет диаметр 460 км (Binzel и др., 1997; Thomas и др., 1997). Предполагается, что ударный процесс, результатом которого является этот кратер, может быть причиной такого быстрого вращения Весты.

Космическим телескопом также были выполнены наблюдения двух астероидов-“кентавров”: 2060 Хирон и 5145 Фолус (Meech и др., 1994; Meech, Veawer, 1996). Это астероиды, которые в афелии находятся за орбитой Сатурна. Одна из целей этих наблюдений – получить ответ на вопрос: эти объекты принадлежат к кометам или к астероидам? Для Фолуса не удалось отождествить кому на изображениях, полученных 28 апреля 1992 г. Наблюдения Хирона проводились 22 и 23 февраля и 8 марта 1993 г. (Meech и др., 1994). На изображениях удалось выявить азимутальные структуры во внешней коме на расстоянии $0.2''$ от ядра. Последующие наблюдения Хирона 23–24 января и 13 апреля 1996 г. в диапазоне длин волн 2221–3301 Å не выявили кометных эмиссий в коме. Удалось также получить кривую блеска дли-

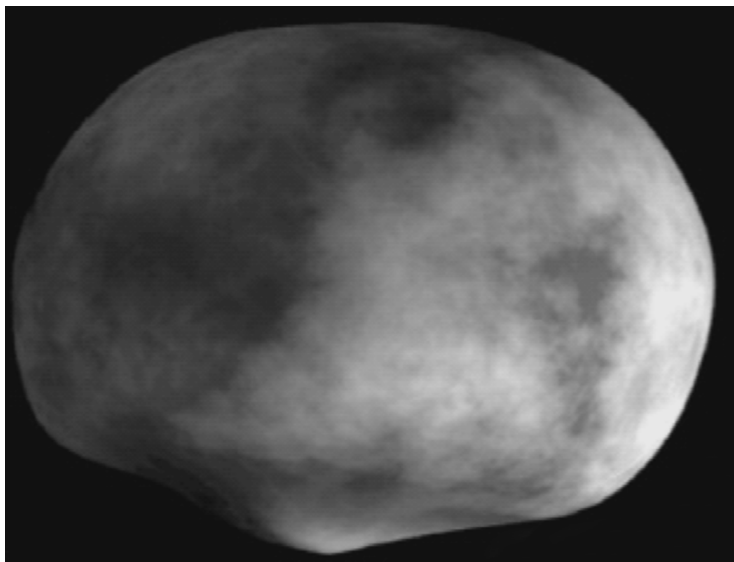


Рис. 2. Изображения астероида 4 Веста в оппозицию 1996 г. (Thomas и др., 1997).

тельностью 4 ч в УФ-диапазоне спектра, а также сделать оценку альбедо ($p = 0.08 \pm 0.01$), принимая диаметр $D = 180$ км. Таким образом, вопрос о том, являются эти астероиды–“кентавры” кометными объектами, остается открытым и нуждается в дальнейшем исследовании. В целом, за время своей работы, на данном телескопе проведены наблюдения более 60 астероидов (Dotto и др., 2002). В настоящее время наблюдательные программы по изучению астероидов на ИСЗ HST продолжают.

17 ноября 1995 г. Европейским космическим агентством запущен ИСЗ ISO (Infrared Space Observatory) (Müller, 2002). На борту ИСЗ были установлены несколько приборов (фотополяриметр, спектрометры высокого и низкого разрешения и др.), охватывающих диапазон длин волн 2.5–240 мкм. За три года работы ИСЗ были проведены наблюдения около 40 астероидов (Müller, 2002). Наблюдения проводились по нескольким программам. Ряд астероидов (1 Церера, 2 Паллада, 3 Юнона, 4 Веста, 6 Геба, 9 Метида, 10 Гигия и др.) наблюдались для использования их в дальнейшем в качестве фотометрических и поляриметрических стандартов в дальней инфракрасной области (Cohen и др., 1998; Müller, Lagerros, 1998; Lagerros и др., 1999). Астероиды 1980 Тезкатлипока, 3200 Фаэтон, 3671 Дионисий и др. исследовались на возможную кометную активность (Harris, Davies, 1999). Для некоторых астероидов получены теплофизические модели и определена тепловая инерция реголита, которая составила 5–25 кал $\text{м}^{-2} \text{с}^{-0.5} \text{К}^{-1}$. Тепловая инерция поверхности Цереры составляет 15 кал $\text{м}^{-2} \text{с}^{-0.5} \text{К}^{-1}$, что почти в три раза меньше чем у Луны (Müller, Lagerros, 1999).

24 апреля 1996 г. был запущен ИСЗ MSX (Mid-course Space Experiment) (Price и др., 1997; 2001). Аппаратура, которая находится на борту этого ИСЗ, позволяет проводить наблюдения в широком интервале длин волн от УФ- до дальнего ИК-диапазона. Проведены наблюдения более 1000 астероидов как в диапазоне 6.8–10.8 мкм, так и в УФ-диапазоне участка спектра (Tedesco и др., 2001). В настоящее время уже получены значения альбедо и диаметров для 168 астероидов (Tedesco и др., 2002b).

КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ К АСТЕРОИДАМ

Первой миссией к астероидам стал КА GALILEO, который был запущен с борта космического корабля Atlantis для исследования системы Юпитера (Yeomans и др., 1993). Траектория аппарата была выбрана таким образом, что он два раза сближался с Землей (1990, 1992 гг.) и, вследствие гравитационных маневров, после первого из них достигал пояса астероидов, а после второго – пересекал пояс. Для исследования было выбрано два среднеальбедных астероида S-типа 243 Ида и 951 Гаспра. Первая встреча состоялась 29 октября 1991 г. с астероидом 951 Гаспра. Получено 57 изображений с наилучшим разрешением 54 метра на пиксель. По результатам обработки изображений (Veverka и др., 1994) определены размеры астероида ($18.2 \times 10.5 \times 8.9$ км), альбедо поверхности (0.23), координаты полюса и прямое направление вращения. Астероид виден как объект очень неправильной формы (см. рис. 3), с кратерами и бороздами на поверхности и может являться обломком большего тела, которое развалилось в результате столкновения. Анализ изображений

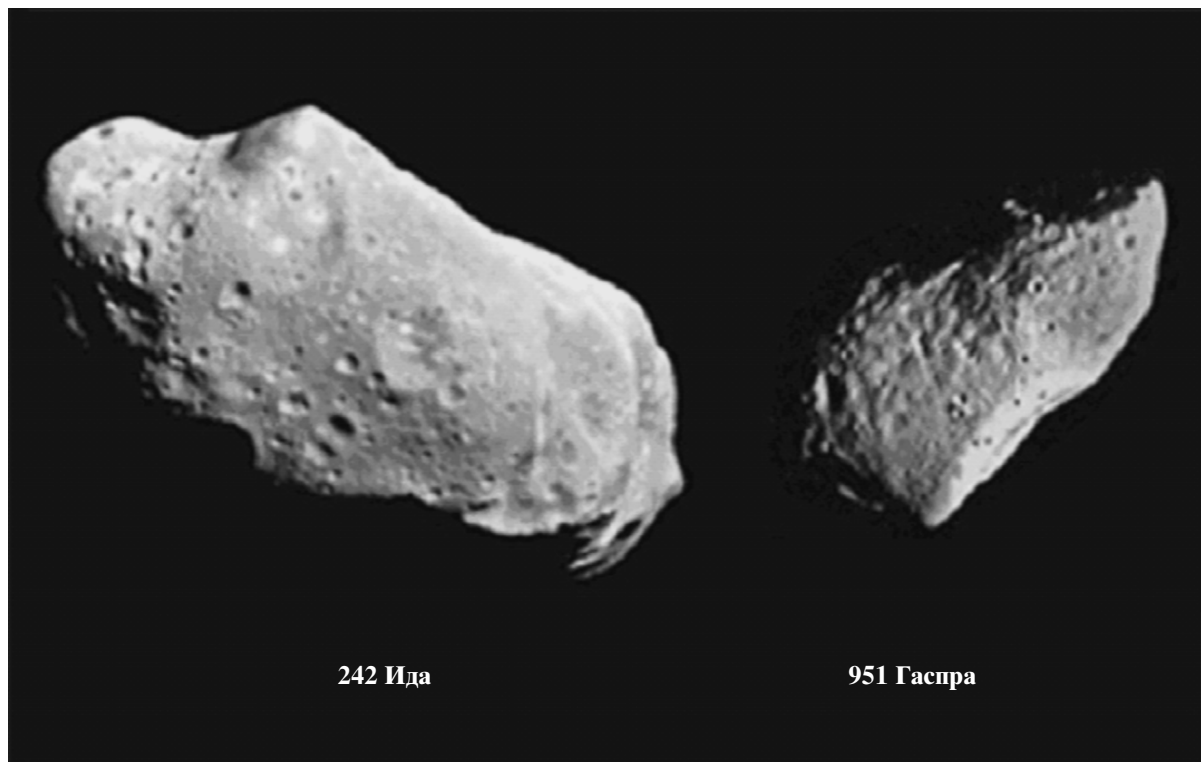


Рис. 3. Изображения астероидов 243 Ида, и 951 Гаспра, полученные межпланетным КА Galileo (Veverka и др., 1994; Belton и др., 1996).

Гаспры показал также, что отношение глубины кратеров к их диаметрам составляет 0.14. Такое значение меньше чем для Луны, Марса и Фобоса (0.2). Это говорит о том, что толщина реголита на поверхности Гаспры больше, чем на других телах. Реголитовый слой грунта Гаспры сложен оливинном и ортопироксеном в отношении 9 : 1 (Veverka и др., 1994).

Встреча КА Galileo с Идой произошла 28 августа 1993 г. Наименьшее расстояние аппарата до Иды составило 2391.2 км, а наилучшее разрешение изображений – 25 м на пиксель. По результатам обработки изображений (Belton и др., 1996) удалось определить размеры ($59.8 \times 25.4 \times 18.6$ км), координаты полюса, альbedo поверхности (0.21), оценить массу ($4.2 \pm 0.6 \times 10^{19}$ г), плотность (2.6 ± 0.5 г/см³) астероида и некоторые другие физические свойства. Объект оказался очень неправильной формы (см. рис. 3) со многими кратерами на поверхности, что свидетельствует о значительной столкновительной истории этого астероида. В отличие от Гаспры, Ида имеет кратеры недавнего происхождения. Наибольший кратер Lascaux достигает 11.8 км в диаметре. Открыт спутник Иды, который получил название Дактиль. Он небольшой, размером всего 1.4 км, находится на расстоянии 85 км. Альbedo Дактиля, 0.20, почти такое же, как и у Иды, но показатели цвета отличаются

от Иды. Это первый спутник у астероидов, открытый космическими методами.

Второй КА, который отправлен к астероидам, имел название NEAR (Near-Earth Asteroid Rendezvous) и запущен 17 февраля 1996 г. (Cheng и др., 1997; Cheng, 2002). В дальнейшем (по прибытии к Эросу) космический аппарат получил название NEAR-Shoemaker, в честь известного американского планетолога Юджина Шумейкера (1928–1997). Главная цель запуска данного аппарата – исследование приближающегося к Земле астероида 433 Эрос, а дополнительная – исследование низкоальбедного астероида главного пояса 253 Матильда. Траектория полета КА была выбрана таким образом, что первая встреча произошла 26–27 июля 1997 г. с астероидом 253 Матильда (см. рис. 4). Аппарат прошел на расстоянии 1212 км от астероида. Получено более 500 изображений этого астероида. По результатам их обработки (Veverka и др., 1999; Clark и др., 1999) удалось определить альbedo (0.036), размеры ($66 \times 48 \times 46$ км) и форму Матильды. По показателям цвета поверхность похожа на углистые хондриты типа CM. Вариаций альbedo и цвета по поверхности не обнаружено. Из изображений также видно, насколько значительны столкновительные процессы в поясе астероидов и их роль в становлении формы астероидов. На поверхности Матильды обнаружено более четырех кратеров, диаметры которых пре-

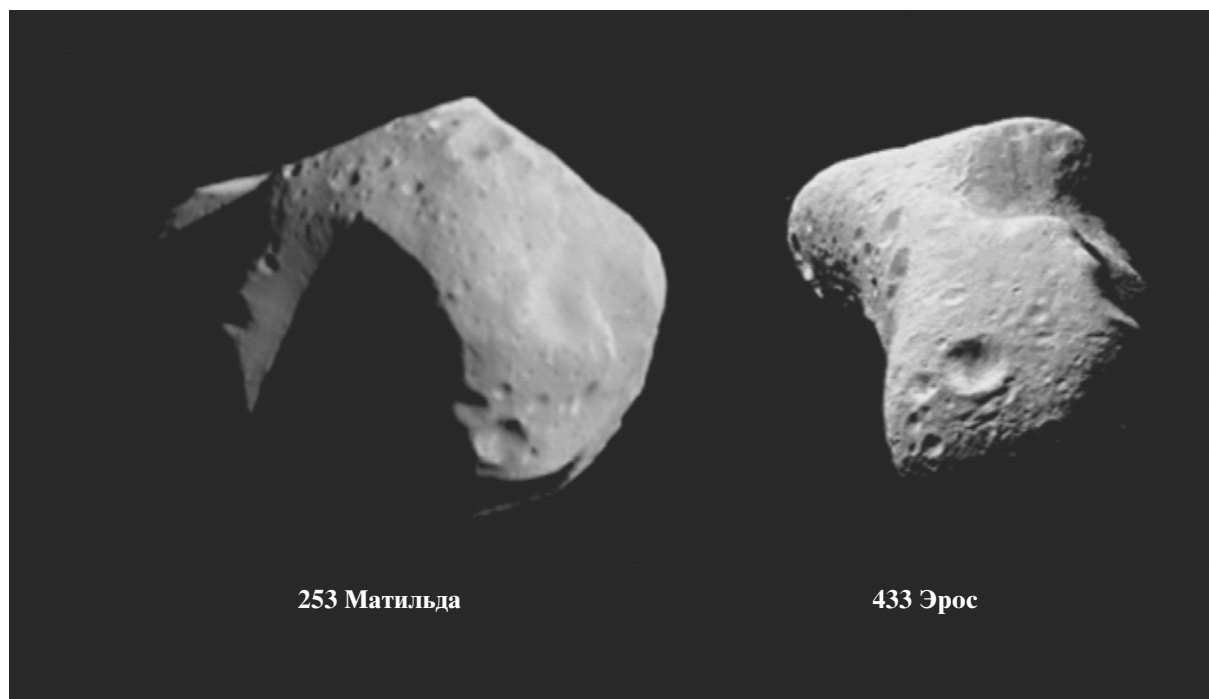


Рис. 4. Изображения астероидов 253 Матильда и 433 Эрос, полученные межпланетным КА NEAR-Shoemaker (Cheng, 2002).

вышают средний радиус астероида (Thomas и др., 1999). Это значение пока является наибольшим по сравнению с другими астероидами, которые исследовались с помощью КА. Наибольший кратер (диаметр 33 км) получил название Кагоо. По отклонениям в траектории КА, которые вызваны притяжением астероида, удалось сделать оценки массы (1.033×10^{20} г) и плотности (1.3 ± 0.2 г см³) Матильды (Yeomans и др., 1997). В настоящее время данный астероид считается одним из наиболее темных и наименее плотных объектов Солнечной системы.

Однако главная цель этого космического эксперимента – астероид Эрос. Это один из крупнейших астероидов, сближающихся с орбитой Земли. Первое сближение КА с Эросом произошло 22–23 декабря 1998 г. Аппарат прошел на расстоянии 4100 км от Эроса и передал свыше 1000 изображений этого астероида с наилучшим разрешением 500 м. На изображениях Эрос виден удлиненным объектом неправильной формы и, по всей вероятности, является обломком большего тела, которое разрушилось вследствие столкновения. Это первые изображения астероидов, которые сближаются и пересекают орбиту Земли и представляют угрозу реального столкновения с Землей.

Основная встреча с Эросом произошла 14 февраля 2000 г. 17 февраля аппарат перешел на орбиту вокруг астероида и в течение года проводил детальное изучение этого объекта. Во время рабо-

ты аппарат находился на высоте 35–50 км над поверхностью Эроса. Удалось определить основные физические свойства Эроса: массу (6.690×10^{18} г), плотность (2.67 ± 0.03 г см³), размеры ($34.4 \times 11.2 \times 11.2$ км), координаты полюса ($\lambda = 17^\circ.24$, $\beta = 11^\circ.35$), период вращения (5.27026 ч), альbedo (0.29) (Cheng, 2002; Domingue и др., 2002; Miller и др., 2002; Thomas и др., 2002). Средняя плотность Эроса оказалась меньшей, чем средняя объемная плотность обыкновенных хондритов, что говорит о более пористом веществе, из которого состоит этот астероид. Незначительное смещение центра масс от центра фигуры предполагает наличие реголитового слоя глубиной до 100 м. В целом Эрос является сплошным твердым телом, прошедшим тепловой разогрев поверхности, в отличие от ранее высказываемого предположения, что этот астероид может состоять из небольших гравитационно связанных тел (“rubble piles”). Переданные изображения (рис. 4) показывают, что, несмотря на неправильность формы, поверхность астероида округлая и имеет достаточно гладкие участки, в отличие от других астероидов (рис. 3). На поверхности Эроса обнаружены не только кратеры, но и различного вида гребни, желоба, впадины, отдельные каменные блоки и камни. Наибольшая седловидная впадина (ширина 10 км) получила название Nimeros, а наибольший кратер (диаметр 5 км) назван Psyche. Кратеры на поверхности Эроса менее глубокие, чем такого же диаметра на Луне. По данным рентгеновской и гамма-спектрометрии, поверхность Эроса сложена веществ-

вом, метеоритным аналогом которого являются обыкновенные хондриты. Получены элементные отношения Fe/Si, Al/Si, Mg/Si, Fe/O, Si/O и др., которые подтверждают силикатную минералогию Эроса.

12 февраля 2001 г. КА NEAR-Shoemaker перешел с круговой орбиты на траекторию спуска и через 4.5 ч благополучно сел на поверхность Эроса. Последний снимок поверхности был сделан с расстояния 120 м. После посадки, в течение 7 дней, аппарат передавал данные гамма-спектрометрии непосредственно с поверхности Эроса. Это первая посадка КА на поверхность таких малых космических тел. Переданный аппаратом гигантский массив данных еще долгое время будет востребован специалистами в различных областях науки для детального изучения.

Космический аппарат DS1 (DEEP SPACE 1) запущен 24 октября 1998 г. к комете Боррелли (Huntress, 1999; Farquhar и др., 2002). В июле 1999 г. аппарат прошел возле астероида 9969 Брайле (1992 KD) на расстоянии 14000 км. Были получены изображения и спектры данного объекта. Спектр астероида подобен спектру астероида 4 Веста, максимальный размер соответствует 2.1 км, а альбедо равно 0.34 (Soberblom и др., 1999; Buratti и др., 2004).

КА Stardust запущен 7 февраля 1999 г. к комете 81P/Вильда-2 для сбора вещества комы кометы и доставки на Землю (Huntress, 1999). 2 ноября 2002 г. аппарат пролетел на расстоянии 3078.5 км от астероида 5535 Аннефранк. По полученным изображениям удалось определить размеры (средний диаметр 5 км) и альбедо (0.24), а также получить фазовую зависимость блеска в диапазоне фазовых углов 47°–134° (Newburn и др., 2003). Это первая фазовая зависимость астероидов, полученная до таких больших фазовых углов.

ПЛАНИРУЕМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТЕРОИДОВ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В настоящее время на заключительной стадии подготовки находятся несколько космических проектов по изучению астероидов. Это, прежде всего, совместный японско-американский проект MUSES-C, проект Европейского космического агентства Rosetta и американский проект DOWN.

КА MUSES-C запущен в марте 2003 г. Институт космоса и астрономических наук в Японии совместно с Лабораторией реактивного движения (США) направили этот аппарат к астероиду 25143 Итокава (1998 SF36) (Huntress, 1999; Farquhar и др., 2002; Yano и др., 2002). Это небольшой астероид с диаметром около 500 м, который относится к группе астероидов, сближающихся с Землей. Аппарат встретится с астероидом летом 2005 г. и на протяжении двух месяцев будет находиться возле

него для всестороннего исследования (определение формы, размеров, объема, плотности, вращательных свойств, измерение элементного и минерального состава поверхности, изучение геологии и морфологии поверхности). После минимального сближения с астероидом будет произведен обстрел поверхности и сбор выброшенных образцов грунта, далее аппарат стартует в направлении Земли. Возвращение к Земле прогнозируется на лето 2007 г., после чего образцы грунта, запечатанные в капсулу, будут сброшены на Землю для последующего исследования в лабораторных условиях.

Европейский КА Rosetta запущен в начале марта 2004 г. Главная цель проекта – исследование кометы Чурюмова–Герасименко, с которой аппарат должен встретиться в 2014 г. После перехода на орбиту вокруг кометы, на поверхность кометы будет сброшен посадочный модуль, который выполнит исследования ядра кометы (элементный, молекулярный, минеральный и изотопный состав поверхности, плотность, пористость и тепловые свойства). Дополнительными целями при пролете через пояс астероидов будут астероиды 4979 Отавара (диаметр 3 км, сближение в июле 2006 г.) и 1170 Сива (диаметр 110 км, сближение в июле 2008 г.). Предполагается определить глобальные характеристики астероидов (форма, размер, плотность и др.), их динамические свойства, поверхностную морфологию и состав (Hechler, 1997; Huntress, 1999; Farquhar и др., 2002).

Идет подготовка КА DOWN к запуску в мае 2006 г. к двум крупнейшим астероидам: 1 Церера и 4 Веста (Farquhar и др., 2002; Russell и др., 2002). Прибытие аппарата к Весте предполагается в июле 2010 г., в течение 11 месяцев КА будет находиться на орбите вокруг Весты, а потом будет осуществлен перелет к Церере (прибытие в августе 2014 г.). В рамках исследовательских программ предполагается всестороннее изучение этих двух астероидов, определение их основных физических характеристик (масса, размер, плотность и др.), определение элементного и минерального состава поверхности, исследование тектонической и ударной истории, изучение их ранней истории и эволюции.

В последнее время интенсивно обсуждаются еще несколько космических программ по изучению астероидов. Это, прежде всего, проект по исследованию и открытию астероидов и комет, сближающихся с орбитой Земли и представляющих потенциальную угрозу столкновения. Он получил название SIMONE (Smallsat Intercept Missions to Objects Near Earth) (Ball и др., 2002). Разрабатывается проект по исследованию внутренней структуры сближающихся с орбитой Земли астероидов, с возможной посадкой исследовательских модулей (ISHTAR – Internal Structure High-resolu-

tion Tomography by Asteroid Rendezvous, D'Arrigo и др., 2002). Следующий проект, под названием BERING, предполагает исследование малых (суб-километровых) астероидов главного пояса (Haack и др., 2002). Конкретные цели этих проектов будут выбраны на заключительной стадии разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на протяжении более 35 лет исследования астероидов проводились с 12 КА. В большинстве случаев это наблюдения с околоземной орбиты по изучению отражательной способности поверхностей астероидов в участках спектра, в которых наблюдения с Земли затруднительны или невозможны вследствие поглощения излучения земной атмосферой. В частности, были определены альбедо в дальних УФ- и ИК-областях спектра избранных астероидов (1 Церера, 2 Паллада, 4 Веста и др.), что дало возможность сделать предположения о минеральном составе и тепловых свойствах поверхности этих астероидов. Конечно же, долговременные наблюдения за астероидами (для определения периодов вращения, координат полюсов, получения фазовых зависимостей блеска и поляризации) еще долгое время будут проводиться с Земли. Но для получения данных по диаметрам и отражательной способности в максимально возможном участке длин волн для большого числа объектов (несколько тысяч) необходимо использовать КА. Данные, которые получены с помощью ИСЗ IRAS, MSX, ISO и других, подтверждают целесообразность таких исследований. Несмотря на то, что эти КА были запущены не конкретно для исследования малых тел и это только небольшая часть их работы, полученные результаты в значительной мере расширили наши знания относительно физических свойств этих тел.

Очень важные результаты были получены по данным КА, непосредственно запущенным к астероидам. Это способствовало решению как чисто прикладных задач (отработка методов гравитационных маневров для запуска аппаратов к любым объектам Солнечной системы, проверка новых навигационных систем, сближение и посадка аппарата на небольшие космические тела, поиск объектов для будущих космических баз и др.), так и выяснению фундаментальных научных вопросов (формирование и эволюция пояса астероидов, пояса Койпера и Солнечной системы в целом). Полученные космические изображения нескольких астероидов подтвердили гипотезу о решающей роли столкновительной эволюции в становлении их поверхностей, формы и вращения. Оценки плотности S-астероидов 242 Ида и 433 Эрос и С-астероида 253 Матильда позволили заключить, что S-астероиды являются монолитными объектами, прошедшими тепловой разо-

грев вещества, в то время как С-астероиды могут быть объектами типа "rubble piles". Решающее значение для понимания тех процессов, которые имели место как на ранних этапах формирования Солнечной системы, так и происходящих в настоящее время будут иметь образцы вещества, взятые с поверхности астероидных тел. Все это определяет важность и целесообразность исследования астероидов с помощью космических аппаратов.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору Института астрономии Харьковского национального университета Д.Ф. Лупишко за ценные замечания и советы по данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- A'Hearn M.F., Feldman P.D. Water vaporization on Ceres // *Icarus*. 1992. V. 98. № 1. P. 54–60.
- Ball A. J., Green S.F., Wells N.S. SIMONE: Near-Earth asteroid rendezvous microsatellites with solar-electric propulsion // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*. Berlin, Germany, 2002. P. 87–90.
- Belton M.J.S., Chapman C.R., Klaasen K.P., et al. Galileo's encounter with 243 Ida: An overview of the imaging experiment // *Icarus*. 1996. V. 120. № 1. P. 1–19.
- Bender D.F., Tedesco E.F. IRAS asteroid and comet ground-based data file // *Lunar and Planet. Sci. Conf. XVII*. 1986. V. 17. P. 38–39.
- Binzel R.P., Gaffey M.J., Thomas P.C., et al. Geologic mapping of Vesta from 1994 Hubble Space Telescope images // *Icarus*. 1997. V. 128. № 1. P. 95–103.
- Brosh L. The first UV spectrum of 2060 Chiron // *Mon. Notis. Roy. Astron. Soc.* 1995. V. 286. P. 1185–1190.
- Buratti B.J., Britt D.T., Soderblom L.A., et al. 9969 Braille: Deep Space 1 infrared spectroscopy, geometric albedo, and classification // *Icarus*. 2004. V. 167. № 1. P. 129–135.
- Butteworth P.S., Meadows A.J. Ultraviolet reflectance properties of asteroids // *Icarus*. 1985. V. 62. № 2. P. 305–318.
- Caldwell J. Ultraviolet observations of small bodies in the Solar System // *Icarus*. 1975. V. 25. № 3. P. 384–396.
- Cheng A.F., Santo A.G., Heeres K.J., et al. Near-Earth Asteroid Rendezvous: Mission overview // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 105. P. 23695–23708.
- Cheng A.F. Near-Earth Asteroid Rendezvous: Mission summary // *Asteroids III* / Ed. Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 251–265.
- Clark B.E., Veverka J., Helfenstain P., et al. NEAR photometry of asteroid 253 Mathilde // *Icarus*. 1999. V. 140. P. 53–65.
- Cohen M., Witteborn F.C., Roush T., et al. Spectral irradiance calibration in the infrared. VIII. 5–14 micron spectroscopy of the asteroids Ceres, Vesta, and Pallas // *Astron. J.* 1998. V. 115. P. 1671–1679.
- D'Arrigo P., Barucci M.A., Lagercrantz C.-I. The ISHTAR mission // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*. Berlin, Germany, 2002. P. 95–98.
- Domingue D.L., Robinson M., Carcich B., et al. Disk-integrated photometry of 433 Eros // *Icarus*. 2002. V. 155. № 1. P. 205–219.

- Dotto E., Barucci M.A., Muller T.G., et al.* Observations from orbiting platforms // *Asteroids III* / Eds. Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 219–234.
- Farquhar R., Kawaguchi J., Russell C., et al.* Spacecraft exploration of asteroids: The 2001 perspective // *Asteroids III* / Ed. Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 367–376.
- Festou M.C., Stern S.A., Tozzi G.P.* Asteroid 4 Vesta: Simultaneous visible and ultraviolet IUE observations // *Icarus*. 1991. V. 94. P. 218–231.
- Gaffey M.J.* The abundance of metal on S-asteroid surfaces: Indications from IRAS 12 and 25 micron flux ratios // *Lunar and Planet. Sci. Conf.* XX. 1989. V. 20. P. 321–322.
- Haack H., Michelsen R., Andersen A.C., Jorgensen J.J.* BERING – a deep space mission to study the smallest asteroids // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*. Berlin, Germany. 2002. P. 83–86.
- Harris A.W., Davies J.K.* Physical characteristics of Near-Earth asteroids from thermal infrared spectrophotometry // *Icarus*. 1999. V. 142. № 2. P. 464–475.
- Hechler M.* ROSETTA mission design // *Adv. Space Res.* 1997. V. 19. № 1. P. 127–136.
- Hestroffen D., Morando B.* Observations of minor planets by Hipparcos // *Pl. Space Sci.* 1995. V. 43. P. 817–820.
- Huntress W.T.* Mission to comets and asteroids // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 90. P. 329–340.
- Lagerros J.S.V., Muller T.G., Klaas U., Erikson A.* ISOPHOT polarization measurements of the asteroids 6 Hebe and 9 Metis at 25 μm // *Icarus*. 1999. V. 142. № 3. P. 454–463.
- Landis R.R., Stern A.S., Wood C.A., Storrs A.D.* Observations of 1 Ceres with HST Faint Object Camera // *Lunar and Planet. Sci. Conf.* XXIX. 1998. V. 29. Abstr. 1937.
- Levan P.D., Price S.D.* 85- μm fluxes from asteroids: 2 Pallas, 7 Iris, 15 Eunomia, and 45 Eugenia // *Icarus*. 1984. V. 57. № 1. P. 35–41.
- Lupishko D.F.* Improved IRAS albedo and diameters of asteroid // *Solar System Research*. 1998. V. 32. № 2. P. 122–127.
- Lupishko D.F., Shevchenko V.G., Tungalag N.* Asteroid photocentre displacement: Influence of the scattering law // *Mem. Soc. Astron. Ital.* 2002. V. 73. № 3. P. 650–654.
- Matson D.L., Tedesco E.F.* History // *Infrared Astronomical Satellite Minor Planet Survey Catalog* / Ed. Tedesco E.F. Phillips Laboratory Technical Report. PL-TR-92-2049. Hanscom Air Force Base. MA. 1992. P. 5–12.
- Meech K.J., Bui M.W., Samarsinha N., et al.* HST observations of Chiron's inner coma. A possible bound atmosphere // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1994. V. 26. № 3. P. 1152–1153.
- Meech K.J., Weaver H.A.* Unusual comets (?) as observed from the Hubble Space Telescope // *Earth, Moon, and Planets*. 1996. V. 72. P. 119–132.
- Miller J.K., Konopliv A.S., Antreasian P.G., et al.* Determination of shape, gravity, and rotational state of asteroid 433 Eros // *Icarus*. 2002. V. 155. № 1. P. 3–17.
- Müller T.G., Lagerros J.S.V.* Asteroids as far-infrared photometric standards for ISOPHOT // *Astron. and Astrophys.* 1998. V. 338. P. 340–352.
- Müller T.G., Lagerros J.S.V.* Fundamental properties and thermophysical modelling asteroids after ISO // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1999. V. 31. № 4. P. 1075.
- Müller T. G.* ISO and asteroids // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*. Berlin, Germany, 2002. P. 91–94.
- Newburn R.L., Duxbury T.C., Hanner M., et al.* Phase curve and albedo of asteroid 5535 Annefrank // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № E11. P. 5117.
- Parker J.Wm., Stern S.A., Tomas P.C., et al.* Analysis of the first disk-resolved images of Ceres from ultraviolet observations with the Hubble Space Telescope // *Astron. J.* 2002. V. 123. № 1. P. 549–557.
- Price S.D., Paxton L.J., Tedesco E.F., Walker R.G.* MSX observations of the Solar System // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1997. V. 29. № 3. P. 1014–1015.
- Price S.D., Egan M.P., Carey S.J., et al.* Midcourse Space Experiment survey of the galactic plane // *Astron. J.* 2001. V. 121. № 5. P. 2819–2842.
- Roettger E.E., Buratti B.J.* Ultraviolet spectra and geometric albedos of 45 asteroids // *Icarus*. 1994. V. 112. № 3. P. 496–512.
- Russell C.T., Coradini A., Feldman W.C., et al.* DOWN: A journey to the beginning of the Solar System // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*. Berlin, Germany, 2002. P. 63–66.
- Soberblom L., Boice D., Britt D., et al.* Deep Space 1 MICAS observations of 9969 Braille // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1999. V. 31. № 4. P. 1127.
- Stickland D.* Farewell to the IUE // *Astron. Now*. 1996. V. 10. № 10. P. 25.
- Storrs A.D., Zellner B., Wells E.N., et al.* Imaging observations of asteroids from the Hubble Space Telescope (HST) // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1994. V. 26. № 3. P. 1176.
- Tedesco E.F., Price S., Egan M.P.* MIMPS // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 2001. V. 33. № 3. Abstr. 41.24.
- Tedesco E.F., Noah P.V., Noah M., Price S.D.* The supplemental IRAS minor planet survey // *Astron. J.* 2002a. V. 123. P. 1056–1085.
- Tedesco E.F., Egan M.P., Price S.D.* The Midcourse Space Experiment infrared minor planet survey // *Astron. J.* 2002b. V. 124. P. 583–591.
- Thomas P.C., Binzel R.P., Gaffey M.J., et al.* Vesta: spin pole, size, and shape from HST images // *Icarus*. 1997. V. 128. № 1. P. 88–94.
- Thomas P.C., Veverka J., Bell III J.F., et al.* Mathilde: Size, shape, and geology // *Icarus*. 1999. V. 140. № 1. P. 17–27.
- Thomas P.C., Joseph J., Carcich B., et al.* Eros: Shape, topography, and slope processes // *Icarus*. 2002. V. 155. № 1. P. 18–37.
- Veeder G.J., Nelson R.M., Lane A.L., et al.* Observations of selected asteroids with the International Ultraviolet Explorer (IUE) // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1980. V. 12. № 3. P. 663.
- Veverka J., Belton M., Klaasen K., Chapman C.* Galileo's encounter with 951 Gaspra: Overview // *Icarus*. 1994. V. 107. № 1. P. 2–17.
- Veverka J., Thomas P., Harch A., et al.* NEAR encounter with asteroid 253 Mathilde: Overview // *Icarus*. 1999. V. 140. № 1. P. 3–16.

- Yano H., Hasegawa S., Abe M., Fujivara A.* Asteroidal surface sampling by the MUSES-C spacecraft // Proc. Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002). Berlin, Germany, 2002. P. 103–107.
- Yeomans D.K., Chodas P.W., Keesey M.S., Owen W.M.* Targeting an asteroid: The Galileo spacecraft's encounter with 951 Gaspra // Astron. J. 1993. V. 105. № 4. P. 1547–1552.
- Yeomans D. K., Barriot J.-P., Dunham D. W., et al.* Estimating the mass of asteroid 253 Mathilde from tracking data during the NEAR flyby // Science. 1997. V. 278. № 5346. P. 2106–2109.
- Zellner B., Albrecht R., Binzel R.P., et al.* Hubble Space Telescope images of Vesta in 1994 // Icarus. 1997. V. 128. № 1. P. 83–87.

АНГЛ. АНН.