



ISSN 1607–2855

Том 1 • № 2 • 2000 С. 63 – 77

УДК 523.44

Физические свойства астероидов

Д.Ф. Лупишко

Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета, Украина

Представлены основные результаты изучения физических свойств астероидов главного пояса и сближающихся с Землей, полученные методами фотометрии, поляриметрии, спектрометрии, радиометрии и с помощью космических миссий «Галилео» и NEAR. Обзор включает следующие разделы: структура пояса астероидов, группы астероидов, семейства; таксономия астероидов и состав вещества их поверхностей; размеры, массы и плотности астероидов; форма и вращение астероидов; оптические свойства и структура поверхностей; о происхождении астероидов. В заключении сформулированы наиболее важные задачи дальнейших наземных исследований астероидов.

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСТЕРОЇДІВ, Лупишко Д.Ф. – Представлено основні результати вивчення фізичних властивостей астероїдів головного поясу та поблизу орбіти Землі, що були одержані методами фотометрії, поляриметрії, спектрометрії, радіометрії, та за допомогою космічних місій “Галілео” і NEAR. Огляд включає такі розділи: структура поясу астероїдів, групи астероїдів, сімейства; таксономія астероїдів та зміст речовини їх поверхонь; розміри, маси і густина астероїдів; форма та обертання астероїдів; оптичні властивості та структура поверхонь; походження астероїдів. У висновках сформульовано найбільш важливі задачі подальших наземних досліджень астероїдів.

PHYSICAL PROPERTIES OF ASTEROIDS, by Lupishko D.F. – The most significant data on the physical properties of main-belt and near-Earth asteroids obtained by photometric, polarimetric, spectroscopic and other techniques, including space missions «Galileo» and NEAR, are presented. The review contains such topics as: structure of the asteroid belt, asteroidal groups and families; taxonomy and composition of asteroids; sizes, masses and densities; shapes and rotation of asteroids; optical characteristics and surface structure; on the origin of asteroids. In Conclusion the most important problems of ground-based observations of asteroids are set up.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение астероидов было начато ровно 200 лет назад, когда итальянский астроном Дж. Пиаци в первую новогоднюю ночь 19 столетия (1 янв. 1801 г.) совершенно случайно открыл астероид 1 Церера, который, как выяснилось впоследствии, оказался крупнейшим представителем нового класса объектов в Солнечной системе. С тех пор между орбитами Марса и Юпитера обнаружено (и каталогизировано, то есть определены параметры орбиты и присвоено постоянный номер и имя) около 10 тысяч объектов, которые составляют пояс астероидов.

С точки зрения фундаментальной науки пояс астероидов – это уникальное образование в Солнечной системе, структура и физическое состояние которого содержат в себе информацию о начальных этапах ее формирования. Изучение физических свойств астероидов главного пояса и тех, которые сближаются с Землей и пересекают ее орбиту, является одним из направлений исследования Солнечной системы, которые наиболее активно разрабатываются в последнее десятилетие. Особая важность этого направления связана с необходимостью решения не только космогонических проблем нашей планетной системы, но также новых проблем выживания человечества – таких, как астероидная опасность и проблема поисков принципиально новых источников сырьевых ресурсов в околоземном космическом пространстве. Без знания физических характеристик и свойств как можно большего числа астероидов

невозможно решить отмеченные выше фундаментальные и прикладные проблемы, связанные с поясом астероидов. Интересным является тот факт, что из всех занумерованных на протяжении 200-летних наблюдений астероидов свыше половины было открыто и каталогизировано в течение последних восьми лет, и свыше четверти – за последние три года. Такое стремительное возрастание скорости обнаружения астероидов свидетельствует о небывалом росте интереса к изучению популяции астероидов вообще и к астероидам, сближающимся с Землей, в частности.

2. СТРУКТУРА ПОЯСА АСТЕРОИДОВ, ГРУППЫ АСТЕРОИДОВ, СЕМЕЙСТВА

Орбиты астероидов главного пояса локализованы в пространстве между орбитами Марса и Юпитера со средним гелиоцентрическим расстоянием 2,8 а.е., хорошо удовлетворяющим правилу Тициуса-Боде. Сечение пояса свидетельствует о его торообразной форме шириной около 1 а.е. (большие полуоси орбит астероидов заключены в пределах от 2,2 а.е. до 3,2 а.е.). Астероиды обладают прямым движением по слабозксцентричным орбитам с эксцентриситетами и наклонами орбит, обычно не превышающими 0,2–0,3 и 10–15°, соответственно. Средняя орбитальная скорость астероидов главного пояса составляет около 20 км/с, при этом один оборот вокруг Солнца астероиды главного пояса совершают за 3–6 лет.

Американский астроном Кирквуд еще в 1866 г. обратил внимание на то, что распределение орбит в поясе по периодам обращения, большим полуосям орбиты или по среднему суточному движению не является равномерным и даже монотонным, а имеются глубокие провалы в распределении (теперь это так называемые люки Кирквуда), где орбиты отсутствуют (рис.1). Причина образования люков хорошо известна – это возмущающее влияние Юпитера. Астероиды избегают те орбиты, которые соизмеримы с орбитой Юпитера. Попадая в люк, астероид оказывается в резонансном движении с Юпитером, который за время $\sim 10^6$ лет раскачивает эксцентриситет его орбиты до значения $e \geq 0,6$ [21, 37] и, тем самым, "выбрасывает" его из люка. Основные люки Кирквуда соответствуют соизмеримостям орбит 1:3, 2:5, 3:7, 1:2 (см. рис.1).

За пределами главного пояса находятся астероиды групп Амура, Аполлона и Атона с

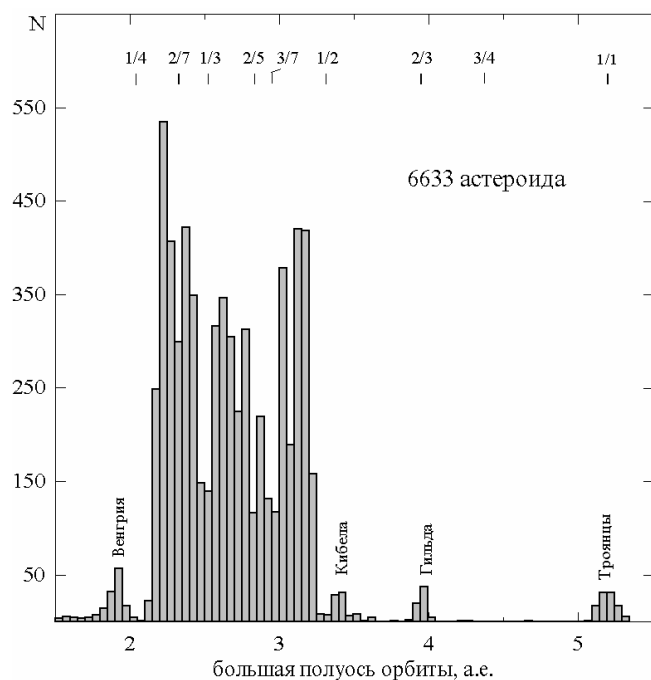


Рис. 1. Распределение астероидов по большим полуосям орбит.

перигелийными расстояниями $q \leq 1.3$ а.е., а также группа Венгрии ($a=1,9$ а.е.). Это так называемые "внутренние" астероиды. С внешней стороны главного пояса расположены относительно малочисленные группы Кибелы ($a=3,4$ а.е.), Гильды ($a=4,0$ а.е.) и Троянцев ($a=5,1$ а.е.), которые находятся в лагранжевых точках орбиты Юпитера. Принадлежность астероидов к группе не предполагает какой-либо общности их происхождения. Это группы случайных астероидов, которые имеют лишь сходную динамическую эволюцию орбит и отделены друг от друга и от остальной части пояса пустыми зонами вековых резонансов.

В отличие от групп существуют семейства астероидов, которые объединяют объекты, связанные между собой общим происхождением. Понятие семейства ввел в 1918 г. японский ученый Хираяма, который занимался поисками родственных, то есть имеющих одинаковое происхождение астероидов. Идея его состояла в том, что родственными астероидами являются те, которые имеют одинаковые или близкие собственные (т.е. неизменные, унаследованные от родительского тела) элементы орбиты. Собственные элементы – это кеплеровы элементы орбит, исправленные за вековые возмущения. У типичных орбит астероидов собственные наклоны и эксцентриситеты мало подвержены вековым изменениям и именно их использовал Хираяма для выделения семейств. Ему удалось выделить пять семейств – Фемиды, Эос, Корониды, Марии и Флоры, существование которых было подтверждено более поздними исследованиями других авторов и которые до настоящего времени остаются основными семействами астероидов. Выделенные в пространстве собственных элементов a , e , i семейства называют динамическими семействами астероидов. В то же время считается общепринятым, что астероидные семейства образуются в результате катастрофических столкновений родительских астероидов. В этом случае члены семейств, кроме близких динамических характеристик, должны обладать и близкими физическими (минералогическими) характеристиками. Новое развитие исследований по идентификации и изучению семейств астероидов, в том числе и так называемых физических семейств, получило в последние годы в работах сотрудников Туринской обсерватории (Италия) под руководством проф. В.Заппала (см., напр., [38, 39]). При выделении семейств пользуются различными статистическими методами, при этом число надежно отождествляемых семейств обычно получается равным 25–30. К ним относится примерно 1/3 астероидов главного пояса. Возраст семейств оценивается в 10^7 – 10^9 лет [15, 26].

3. ТАКСОНОМИЯ АСТЕРОИДОВ И СОСТАВ ВЕЩЕСТВА ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

По своим оптическим свойствам (альbedo, цвет, поляризация, спектральные и др. характеристики) астероиды разделяются на таксономические классы (композиционные типы, composition – состав), отражающие в первую очередь различия в составе вещества или, точнее, в типе минералогии вещества поверхности. К настоящему времени выделено 15 классов астероидов, которые обозначены заглавными буквами, как правило, несущими смысловую нагрузку. Описание всех классов астероидов с указанием интервала альbedo, спектральных особенностей и метеоритных аналогов вещества содержится в обзоре [25].

По величине геометрического альbedo таксономические классы можно разделить на три группы: низкоальбедные – C, P, D, B, F, G, T и K-классы с альbedo астероидов $p_v=0,04 \div 0,10$; среднеальбедные – S, M, Q, V ($p_v=0,10 \div 0,25$) и высокоальбедные – A, R и E-классы ($p_v=0,20 \div 0,55$). Основными классами, которые охватывают свыше 95% астероидов, являются:

C-класс (carbon), очень темные с альbedo $0,04 \div 0,09$, плоскими нейтральными спектрами и слабой полосой поглощения в ультрафиолете. Некоторые из C-астероидов имеют в спектре 3 мкм полосу поглощения кристаллизационной H_2O , указывающую на присутствие гидратированных силикатов. Предполагаемая минералогия поверхности включает филлосиликаты, углерод, органику. Угlistые хондриты являются наиболее подходящими метеоритными аналогами их вещества.

S-класс (silicates), умеренное альbedo ($0,10 \div 0,30$), широкая УФ-полоса поглощения, длинноволновое крыло которой определяет форму спектра отражения (его наклон) в видимом диапазоне длин волн; полосы поглощения силикатов в ближней ИК-области (1 и 2 мкм), значительные спектральные вариации.

Вещество S-астероидов содержит оливин, пироксен, металл. Железо-каменные метеориты, обыкновенные хондриты и ахондриты – возможные аналоги их вещества.

М-класс (metal), умеренное визуальное альbedo ($0,12 \pm 0,25$) и высокое радарное, плоский спектр с небольшим положительным наклоном в красную область и без заметных полос поглощения. Содержит Fe-Ni металл, силикаты (энстатит). Соответствующими аналогами вещества являются железо-каменные и железные метеориты (возможно, с силикатными включениями).

Е-класс (enstatite), самые высокоальбедные астероиды ($p_v=0,40 \pm 0,55$), плоский спектр без спектральных особенностей (полос) с возрастанием отражательной способности в красную область, подобно М-астероидам. Вещество содержит энстатит и, возможно, другие силикаты. Энстатитовые ахондриты и обриты – метеоритные аналоги вещества. Большинство членов гр уппы Венгрии ($a=1,9$ а.е.) являются Е-астероидами.

Относительная распространенность астероидов различных классов (типов) следующая: С-тип и другие низкоальбедные астероиды составляют 75% от всей популяции астероидов, S-тип (силикатные) – 15%, на долю остальных типов остается всего 10%, среди которых наиболее многочисленными являются М-астероиды (металлические). К настоящему времени их отождествлено около 70.

Наибольшее распространение получила классификация Толена [34], основанная на кластерном анализе результатов восьмичетной фотометрии 589 астероидов.

Основным источником информации о минеральном составе вещества поверхностей астероидов являются спектральные наблюдения в видимой и ИК областях спектра, а интерпретация этих данных основана большей частью на сравнении их с соответствующими лабораторными спектрами метеоритов и земных минералов. Такие исследования низкоальбедных астероидов (включая обнаружение полосы поглощения связанной воды на длине волны 3 мкм в спектре Цереры и других крупных астероидов С-типа) показали, что их вещество соответствует водосодержащим углистым хондритам типов CI и CM. Эти хондриты содержат относительно богатые железом гидратированные силикаты (филлосиликаты) и минералы группы серпентина. Они отличаются высоким содержанием летучих: воды – до 20 вес. %, углерода – до 5 вес. % как в виде графита, так и в форме органических соединений. Общее содержание органики может достигать 10% (сложные органические кислоты, углеводороды). Непрозрачной фазой, обуславливающей низкое альbedo астероидов, являются магнетит, углерод и его соединения, включая и органическое вещество. Матричное вещество этих хондритов (~80%) в виде гидратированных силикатов (монтмориллонит, серпентин, хлорит) указывает на то, что на их родительских телах, то есть на низкоальбедных астероидах, имели место процессы низкотемпературной водной переработки вещества. В связи с этим возникает вопрос, а существует ли в поясе астероидов изначальное примитивное вещество протосолнечной туманности, которое не претерпело какой-либо переработки? Оказалось, что имеет место обратная линейная корреляция между содержанием гидратированных силикатов (т.е. интенсивностью полосы поглощения на 3 мкм) и гелиоцентрическим расстоянием астероида. При этом из всех низкоальбедных типов только Р и D-астероиды не показывают этой полосы. Эти астероиды находятся за пределами главного пояса в группах Гильды и Троянцев и характеризуются очень низким альbedo и красноватым цветом, что, по-видимому, обусловлено наличием красных органических конденсатов, содержащихся также в примитивном веществе кометной пыли. Таким образом, богатые летучими астероиды Р и D-типов не испытали за время своего существования даже слабого нагрева, обеспечивающего гидротермальную переработку вещества, и поэтому рассматриваются как наиболее примитивные.

В качестве основных компонентов состава вещества S-астероидов спектрофотометрия указывает на оливин, пироксены и Fe-Ni металл. Такой состав качественно не является диагностичным по отношению к эволюционной истории объекта, поскольку и обыкновенные хондриты (недифференцированное вещество) и железо-каменные метеориты (дифференцированное) состоят из указанных компонентов. Вместе с тем центральной проблемой в понимании природы и состава вещества S-астероидов является следующая: прошло ли это вещество стадию магматической дифференциации в недрах данного S-

астероида или его родительского тела, или же оно является первоначальным и недифференцированным, подобным веществу обыкновенных хондритов. Однозначных данных по этому вопросу пока нет, однако все большее признание получают результаты исследований М. Гэффи и соавторов, согласно которым крупные астероиды внутренней части пояса в прошлом подверглись интенсивному постаккреционному разогреву, плавлению и магматической дифференциации вещества. Большинство S-астероидов имеют оливино-металлический состав с относительно небольшой долей пироксена ($OI/Px \geq 2,5$), поэтому имеются основания предполагать, что нынешние S-астероиды являются фрагментами разрушенных более крупных S-астероидов, сформированными вблизи границы ядро-мантия в родительском теле.

До настоящего времени единственным крупным астероидом, о котором известно, что он прошел стадии разогрева и дифференциации вещества, является 4 Веста (V- тип, $D=525$ км). Этот астероид сохранил свою базальтовую кору и, по-видимому, является родительским телом базальтовых ахондритов-эвкритов.

Астероиды М-типа выделены в отдельный класс поскольку их спектры в области 0,3-2,5 мкм не имеют заметных полос поглощения, а отражательная способность возрастает с длиной волны подобно спектрам железных метеоритов и энстатитовых хондритов с высоким содержанием свободного металла. Наиболее полное исследование состава вещества М-астероидов было проведено на Астрономической обсерватории Харьковского ун-та [24]. С этой целью были осуществлены специальные программы фотометрических и поляриметрических наблюдений крупнейших астероидов М-типа, а также лабораторные аналогичные исследования метеоритных и земных образцов различного состава. Основным результатом этих исследований состоит в том, что поверхности крупнейших М-астероидов не являются чисто металлическими, как утверждали Дольфюс и др. [14], а содержат значительную силикатную компоненту. Наиболее подходящими метеоритными аналогами вещества М-астероидов являются железо-каменные метеориты – мезосидериты и энстатитовые хондриты типа E4. Этот вывод, сделанный еще в 1988 г., получил подтверждение в последние годы в результате обнаружения так называемых «wet» («мокрых, влажных») астероидов М-типа, содержащих интенсивные полосы поглощения H_2O гидратированных силикатов вблизи 3 мкм [23, 30]. Присутствие таких минералов (филлосиликатов) указывает на то, что температура их родительского тела никогда не превышала $500K^\circ$. Кроме того, результаты спектральных наблюдений М-астероидов в последние годы показали, что в их спектрах присутствуют также слабые полосы поглощения силикатов в видимой области спектра [13].

4. РАЗМЕРЫ, МАССЫ И ПЛОТНОСТИ АСТЕРОИДОВ

Это фундаментальные характеристики астероидов, которые, с одной стороны, определяют характер их эволюции, а с другой, – позволяют судить об общей массе и о распределении вещества в поясе астероидов.

Первые представления о размере астероида получают из фотометрических оценок блеска астероида при его обнаружении. Блеск определяется средней отражательной способностью астероида, то есть альбедо, и его размером. Поэтому, чтобы на основании измеренного блеска астероида получить оценку его размера, необходимо задать наиболее вероятное значение его альбедо. Если известен тип астероида (таксономический класс, напр., C, S, M, E или др.), то задают среднее значение альбедо для данного типа астероидов и получают уже более точное значение размера (диаметра) астероида. Однако и эта оценка является весьма приближенной.

В настоящее время диаметры астероидов определяют одним из следующих методов: радиометрическим, поляриметрическим, методом покрытия звезд астероидами (наиболее точный из всех наземных методов), спекл-интерферометрическим, а также по данным радиолокационных наблюдений и по изображениям, получаемым с борта космического аппарата. В табл. 1 приведены размеры крупнейших астероидов по данным радиометрических измерений IRAS-спутника [33] и классификации Толена [34].

Распределение астероидов по размерам описывается степенным законом

Таблица 1. Крупнейшие астероиды главного пояса

Астероид	Такс. класс	D , км	Астероид	Такс. класс	D , км
1 Церера	G	848	324 Бамберга	CP	229
2 Паллада	B	498	451 Пациенция	CU	225
4 Веста	V	468	107 Камилла	C	223
10 Гигия	C	407	532 Геркулина	S	222
511 Давида	C	326	48 Дорис	CG	222
704 Ингерамния	F	317	45 Евгения	FC	215
52 Европа	CF	303	29 Амфитрита	S	212
87 Сильвия	P	261	121 Гермiona	C	209
31 Ефросина	C	256	423 Диотима	C	209
15 Эвномия	S	255	13 Эгерия	G	208
16 Психея	M	253	94 Аврора	CP	205
65 Кибела	P	237	88 Фисба	CF	201
3 Юнона	S	234	7 Ирис	S	200

$$N = kD^{-b},$$

где N – число астероидов диаметром больше D км, k – константа, b – показатель распределения. Для всей выборки астероидов главного пояса ($200 \text{ км} > D > 20 \text{ км}$) показатель распределения $b \geq 2$ и близок к значению $b=2,5$ [16], которое следует из моделирования процессов столкновительной эволюции в поясе. Однако этот параметр зависит от диапазона размеров астероидов и точное определение его затруднительно из-за влияния наблюдательной селекции (чем меньше диаметр астероидов, тем меньше полнота их обнаружения). Для крупных астероидов, полнота обнаружения которых составляет 100%, показатель распределения равен [22]:

$$\begin{aligned} D > 260 \text{ км}, & \quad b = 1,58 \pm 0,25 \\ 48 \text{ км} > D > 130 \text{ км}, & \quad b = 2,02 \pm 0,14 \end{aligned}$$

Как отмечается в работах [22, 27], значение параметра $b \geq 2$ является сильным указанием на преобладание в поясе астероидов процессов столкновительной фрагментации, поскольку для процессов аккреции характерно значение $b=1,65 \pm 0,11$.

Астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), отличаются от астероидов главного пояса относительно малыми размерами. Крупнейший из них – астероид 1036 Ганимед (группа Амура) имеет диаметр около 40 км, два других астероида 433 Эрос и 3552 Дон Кихот – около 20 км, все остальные астероиды – меньше 10 км, причем 3/4 из них имеют диаметры меньше 3 км. Ясно, что подавляющее число АСЗ не превышают в размерах 1 км, однако они еще далеко не все обнаружены из-за слабого блеска. Наименьшие из обнаруженных к настоящему времени АСЗ группой Т.Герельса на обсерватории Кит Пик (Аризона, США) имеют размеры всего около 3-6 м.

Оценки масс и плотностей были получены только для нескольких астероидов, что, безусловно, связано с трудностью определения этих характеристик. Основным и почти единственным методом определения массы астероида из наземных наблюдений является измерение и анализ возмущений, вызываемых им в движении другого астероида. Эффекты эти очень малы, и чтобы они могли быть обнаружены при наблюдениях, необходимо, чтобы эти астероиды имели тесные взаимные сближения (желательно периодически повторяющиеся, чтобы эффект возмущений орбиты накапливался). Кроме того, необходимо иметь достаточно точную теорию движения тела, орбита которого претерпевает возмущения, а также высокоточные астрометрические наблюдения в течение длительного промежутка времени (порядка нескольких десятилетий).

Первые прямые определения массы астероида осуществил Х. Герц в 1966 году. Уточняя теорию движения малой планеты 197 Арета, он обнаружил, что последняя сближается с астероидом 4 Веста до 0,04 а.е. каждые 18 лет, что должно приводить к накоплению возмущений. Герц использовал наблюдения Ареты в течение 28-ми оппозиций и получил массу Весты, равную $1,20 \times 10^{-10}$ массы Солнца с

Таблица 2. Результаты определений масс и плотностей астероидов

Астероид	Масса, г	Плотность, г/см ³	Тип	Ссылка
1 Церера	$0,92 \times 10^{24}$	2,3	G	[32]
2 Паллада	$2,1 \times 10^{23}$	2,6	B	[31]
4 Веста	$2,8 \times 10^{23}$	3,5	V	[32]
10 Гигия	$0,9 \times 10^{23}$	2,2	C	[20]
243 Ида	$(4,2 \pm 0,6) \times 10^{19}$	$2,6 \pm 0,5$	S	[11]
253 Матильда	$(1,033 \pm 0,044) \times 10^{20}$	$1,3 \pm 0,2$	C	[36]
433 Эрос	$7,25 \times 10^{18}$	$2,5 \pm 0,8$	S	[35]

Таблица 3. Средние значения амплитуд кривых блеска и скоростей вращения

Популяция	\bar{D} , км	Наблюд. амплитуда, зв. вел.	N	Исправл. амплитуда, зв. вел.	Скорость вращения, об/сутки	N
АСЗ	$2,7 \pm 0,4$	$0,53 \pm 0,04$	113	0,29	$4,80 \pm 0,30$	119
АГП ($D < 12$ км)	$6,8 \pm 0,3$	$0,35 \pm 0,03$	102	0,28	$4,34 \pm 0,23$	100
АГП ($D > 130$ км)	$185,8 \pm 0,9$	$0,22 \pm 0,01$	100	0,19	$2,90 \pm 0,12$	100

формальной ошибкой около 10%. В 70-х годах И. Шубарт изучал взаимные возмущения орбит, которые производили пары крупнейших астероидов главного пояса 1 Церера – 2 Паллада и 1 Церера – 4 Веста, и получил свои оценки масс этих астероидов. В последующее время было выполнено несколько новых определений масс крупнейших астероидов по наземным наблюдениям (см. результаты и ссылки в работах [19, 20, 32]. Кроме того, в последние годы были получены первые оценки масс и плотностей астероидов S-типа 243 Ида 433 Эрос и астероида 253 Матильда (C-тип) по данным измерений космических аппаратов (миссии "Галилео" и NEAR).

Неожиданно низкая плотность C-астероида 253 Матильда (см. табл. 2), по сравнению с плотностью аналогов ее вещества – углистых хондритов CM-типа ($\rho = 2,75$ г/см³), – предположительно объясняется высокой пористостью вещества этого астероида, которая согласно оценкам составляет около 50% [36]. Еще одна возможность – наличие водяного льда в подповерхностных слоях Матильды, присутствие которого неизбежно повлечет уменьшение средней плотности вещества астероида. К сожалению, пока нет никаких оценок плотности вещества M-астероидов. Однако, как отмечалось выше, вещество астероидов M-типа скорее всего подобно железо-каменным метеоритам и содержит около 50% силикатов. Анализ средней скорости осевого вращения M-астероидов тоже указывает на то, что их плотность должна быть порядка 6 г/см³, то есть примерно средней между силикатами и чисто металлическим составом [17].

5. ФОРМА И ВРАЩЕНИЕ АСТЕРОИДОВ

Информацию о форме астероидов обычно получают из фотометрических кривых блеска, поскольку форма кривых блеска обусловлена в первую очередь изменением видимого поперечного сечения вращающегося тела. Поэтому амплитуда кривой блеска обычно рассматривается как характеристика соотношения осей фигуры, то есть вытянутости формы астероида.

Табл. 3 содержит средние значения наблюдаемых и приведенных к фазовому углу $\alpha = 0^\circ$ амплитуд кривых блеска более ста АСЗ и примерно такого же числа астероидов главного пояса (АГП) малых размеров. Почти одинаковые исправленные средние амплитуды АСЗ и АГП малых размеров указывают на их в среднем одинаковые формы. Очень часто форму астероида аппроксимируют трехосным эллипсоидом с осями $a > b > c$. В этом случае вытянутость его формы со средней амплитудой кривой блеска 0,28–0,29 зв. вел. будет характеризоваться соотношением полуосей $a:b=1,3$. Вполне естественно, что крупные астероиды главного пояса имеют в среднем более сферические формы (амплитуда 0,19 зв. вел.), они характеризуются средним соотношением полуосей $a:b=1,2$. Однако, конкретные астероиды

Таблица 4. Средние значения амплитуд и периодов вращения астероидов

Тип	Количество астероидов	A_{\max} , зв.вел	P , час
M	40	$0,35 \pm 0,04$	$7,80 \pm 0,91$
S	195	$0,31 \pm 0,01$	$12,50 \pm 0,86$
C	128	$0,23 \pm 0,02$	$13,38 \pm 1,49$

имеют различные формы, которые варьируются от почти сферических (1 Церера) до очень вытянутых и неправильных (1620 Географ и 1865 Цербер с соотношениями осей 2,8 и 3,2, соответственно), и до раздвоенных и контактно-двойных (4179 Тоутатис, 4769 Касталия). Изображение астероида 433 Эрос было получено с КА NEAR после выхода его на орбиту вокруг Эроса 14 февр. 2000 года. Примерно такие же изображения были получены также для астероидов главного пояса 243 Ида, 253 Матильда и 951 Гаспра.

К настоящему времени данные по скоростям вращения получены примерно для 800 астероидов. Они показывают, что диапазон известных значений периодов вращения астероидов весьма велик: от 2,273 час у АСЗ 1566 Икар до 160 час у астероида 1481 Тюбингия, а может быть, даже до 1150 час (288 Глауке). Однако для большинства астероидов угловые скорости вращения заключены в пределах 1÷4 об/сут с наиболее вероятным значением периода около 8 час. При существующих диапазонах диаметров и масс наблюдаемых астероидов (4 и 12 порядков, соответственно) такой интервал скоростей вращения для большинства астероидов представляется настолько узким, что для его поддержания необходим эффективный саморегулирующий механизм.

На рис.2 представлены гистограммы распределения по скоростям вращения для АСЗ и АГП соответствующих размеров, а также для крупных АГП. Обе популяции астероидов малых размеров (и АСЗ, и АГП) характеризуются близкими средними значениями скоростей и близкими дисперсиями среднего ($4,80 \pm 0,30$ и $4,34 \pm 0,23$ об/сутки, см. табл. 3). В то же время распределение по скоростям вращения крупных АГП (рис.2, нижняя гистограмма) и соответствующие параметры их формы и вращения (табл. 3, нижняя строка) – существенно другие. Таким образом, можно заключить, что в среднем АСЗ вращаются примерно так же, как и АГП сравнимых размеров, и значительно быстрее по сравнению с крупными АГП, что является отражением V-образного характера зависимости скоростей вращения (и амплитуд кривых блеска) астероидов от их диаметров с минимумом вблизи $D=125$ км [12].

Уже давно замечено, что М-астероиды вращаются в среднем быстрее, чем астероиды С- и S-типов. В табл. 4 представлены средние значения периодов вращения и амплитуд кривых блеска для астероидов основных типов. Различия в скоростях вращения между астероидами М-типа и остальными, как видно из таблицы, довольно большие, и это является одной из основных

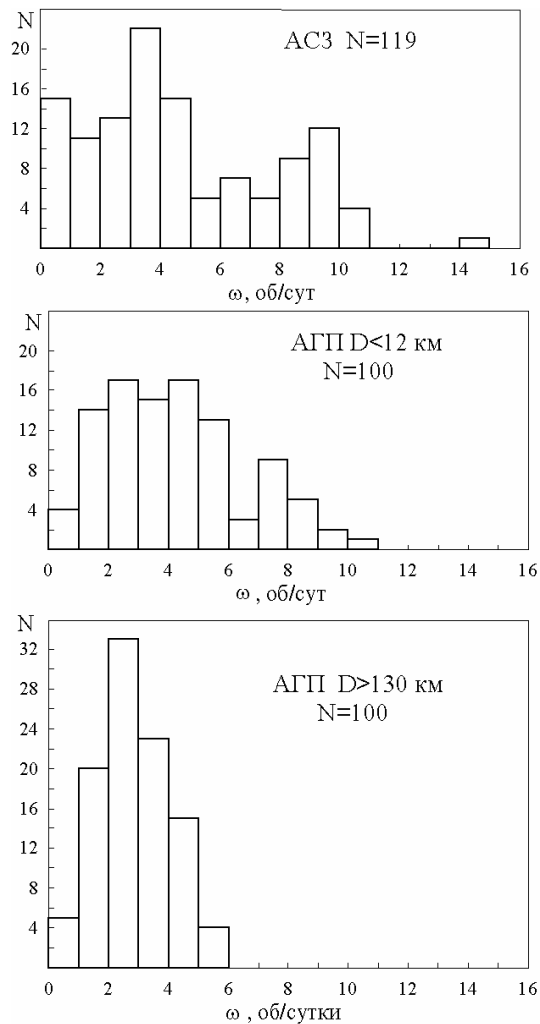


Рис.2. Распределение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и астероидов главного пояса (АГП) по скоростям вращения.

Табл. 5. Средние альбедо и показатели цвета астероидов основных типов

Тип	p_v	U-B	B-V	β_v
C	$0,06 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,08$	$0,69 \pm 0,03$	$0,043 \pm 0,001$
S	$0,20 \pm 0,07$	$0,45 \pm 0,05$	$0,86 \pm 0,04$	$0,030 \pm 0,001$
M	$0,17 \pm 0,04$	$0,25 \pm 0,06$	$0,72 \pm 0,09$	$0,032 \pm 0,001$
E	$0,52 \pm 0,03$	$0,25 \pm 0,03$	$0,72 \pm 0,04$	$0,024 \pm 0,002$

особенностей вращения М-астероидов. Видно также, что скорости вращения уменьшаются при переходе от М к S и С-типам, то есть тоже коррелируют с плотностью вещества. Это полностью согласуется с теорией Харриса [18], согласно которой скорость вращения должна увеличиваться прямо пропорционально корню квадратному от средней плотности вещества астероида.

Как видно из табл. 4, имеет место также уменьшение средней амплитуды кривых блеска (то есть вытянутости формы) при переходе от более плотных М-астероидов к наименее плотным и, следовательно, наименее прочным С-астероидам. Таким образом, более прочные М-астероиды в среднем имеют более вытянутую форму. Этот факт и более быстрое вращение М-астероидов качественно согласуются с предположением о том, что современное вращение и форма астероидов приобретены ими в процессе столкновений.

Направление вращения астероидов (прямое или обратное) также, как и ориентация осей вращения в пространстве, известны сейчас примерно для 90 астероидов [4]. Анализ этих данных показывает, что:

- а) крупнейшие астероиды Церера, Паллада и Веста ($D \geq 500$ км), содержащие в себе около 2/3 всей массы астероидного вещества, вращаются в прямом направлении;
- б) обратное вращение наблюдается среди астероидов вплоть до диаметра 430 км (10 Гигия); соотношение между числом астероидов с прямым и обратным вращением по имеющейся выборке составляет примерно 3:2;
- в) нет значимых различий в средних значениях амплитуд кривых блеска и периодов вращения астероидов с прямым и обратным вращением;
- г) зависимость доли астероидов с обратным вращением от их диаметров показывает четкий минимум вблизи $D=150$ км (рис.3), аналогично минимумам в зависимостях скоростей вращения и амплитуд от диаметров вблизи $D=125$ км.

Присутствие минимумов в области $D=125-150$ км на трех зависимостях указывает на устойчивый характер этой особенности и ее космогоническую природу. Необходимо количественное объяснение этого феномена, который условно можно назвать «космогонический диаметр».

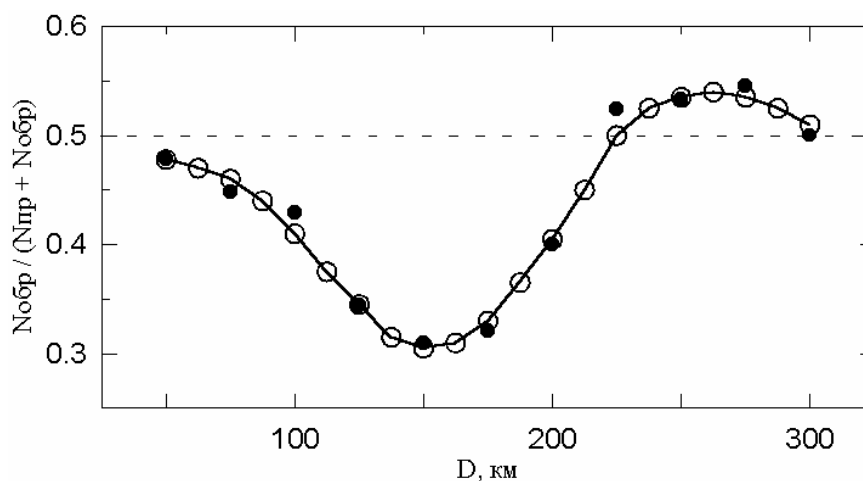


Рис. 3. Зависимость доли астероидов с обратным вращением от их диаметров.

6. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТЕЙ

Одной из основных оптических характеристик поверхностей астероидов является их альbedo. К настоящему времени геометрическое альbedo, характеризующее среднюю отражательную способность по видимому диску, измерено для около 2000 астероидов. Эти данные показывают отчетливую бимодальность в распределении астероидов по альbedo с максимумами при альbedo $p_v=0,052\pm 0,015$ и $p_v=0,19\pm 0,05$ [9]. Причина бимодальности хорошо известна – это существование низкоальбедных (C, B, F, G, P, D-типы) и среднеальбедных (S, M, Q, V-типы) астероидов. При этом весь диапазон альbedo астероидов $0,03\div 0,60$ превышает один порядок [33].

В табл. 5 представлены средние альbedo в полосе V и показатели UVV-цветов астероидов, а на рис.4 представлена диаграмма альbedo-цвет астероидов, которая дает представление не только о значениях этих параметров, но и о делении астероидов на типы (буквами отмечен тип астероидов).

Из-за малых угловых размеров астероидов основным источником информации о рассеянии света их поверхностями являются фазовые зависимости блеска, цвета и поляризации. Для астероидов главного пояса фазовый угол α (угол Солнце-астероид-наблюдатель) обычно не превышает 30° и типичная фазовая кривая (рис.5) имеет линейный участок при $\alpha \geq 7^\circ$, на котором уменьшение блеска с углом фазы описывается выражением

$$V(1, \alpha) = V(1,0) + \beta_v \alpha,$$

где: $V(1,0)$ – абсолютная звездная величина астероида при $\alpha=0^\circ$, β_v – фазовый коэффициент, характеризующий изменение блеска при изменении α на один градус (табл. 5). При углах фазы $\alpha \leq 7^\circ$ наблюдается нелинейное возрастание блеска, так называемый оппозиционный эффект. Как показали исследования этого эффекта, проведенные на АО ХГУ В.Г. Шевченко, величина его зависит от альbedo и поэтому она разная для разных типов астероидов, что дает важную информацию о механизмах его формирования [8].

Поляриметрические исследования дают возможность изучать вариации параметров поляризации по поверхности астероида, получать фазовые кривые степени поляризации, параметры которых используются для определения альbedo астероидов, классификации их по типам, изучения структуры поверхностей. Важные результаты (некоторые из них на уровне новых эффектов) были получены в последние годы при изучении спектральной зависимости параметров поляризации (Лушишко, Дисс.). Все это свидетельствует о высокой эффективности поляриметрического метода в изучении астероидов.

Закон рассеяния света (ЗРС) поверхностью астероида является важнейшей ее оптической

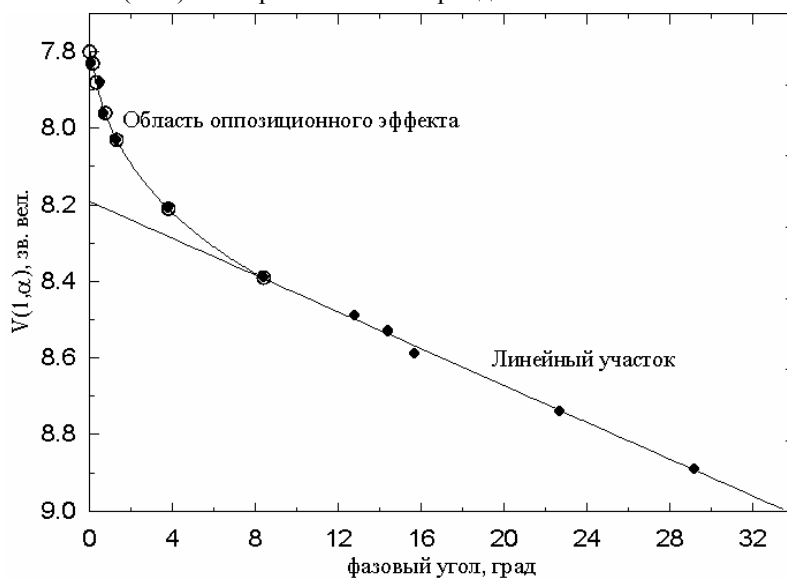


Рис. 4. Диаграмма «альbedo – цвет» астероидов.

характеристикой, знание которой необходимо для самых различных целей. Однако в случае астероидов определение ЗРС представляет большую сложность, поскольку они наблюдаются как точечные источники. Идея состояла в том [2], чтобы для определения закона использовать характеристику интегрального блеска, а именно: зависимость амплитуды кривых блеска от фазового угла. Численное моделирование этой зависимости для разных ЗРС и сравнение результатов с данными наблюдений показало, что из всех известных законов распределения яркости по диску планеты только законы Акимова и Хапке удовлетворяют наблюдениям астероидов. Однако теоретический закон Акимова для предельно шероховатой поверхности является гораздо более простым и удобным для использования по сравнению с законом Хапке.

Знание ЗРС в свою очередь способствовало решению проблемы о степени фотометрической неоднородности поверхностей астероидов [1]. Оказалось, что вариации отражательной способности, усредненной по видимой стороне (полусфере) астероида достигают значений 0,20 зв. вел., то есть больше, чем для поверхностей Марса и галилеевых спутников Юпитера. Таким образом, поверхности астероидов являются значительно более неоднородными, чем считалось ранее.

В отличие от Луны поверхности астероидов формируются под воздействием только внешних факторов, к которым относятся:

- метеоритная бомбардировка поверхности с образованием кратеров, то есть рельефа и реголита;
- микрометеоритная бомбардировка, обуславливающая переработку реголита и формирующая его структуру, степень зрелости и др.;
- облучение солнечными и галактическими корпускулами, что приводит к переработке частиц поверхностного слоя (образование треков в частицах, восстановление элементов из окислов, образование пленок чистых металлов на поверхности зерен реголита и др.).

Данные радиометрических, радарных, поляриметрических и фотометрических наблюдений астероидов указывают на наличие реголита, то есть чехла раздробленного рыхлого вещества на поверхностях астероидов, что хорошо подтверждено прямыми изображениями астероидов Гаспра, Ида, Матильда и Эрос с высоким разрешением. Поверхности этих астероидов оказались очень кратерированными, что указывает на интенсивные процессы бомбардировки в поясе. Моделирование процессов образования и свойств астероидных реголитов показывает, что последние должны быть:

- более рыхлыми (т.е. менее спрессованными), чем лунный реголит, вследствие существенно меньшей

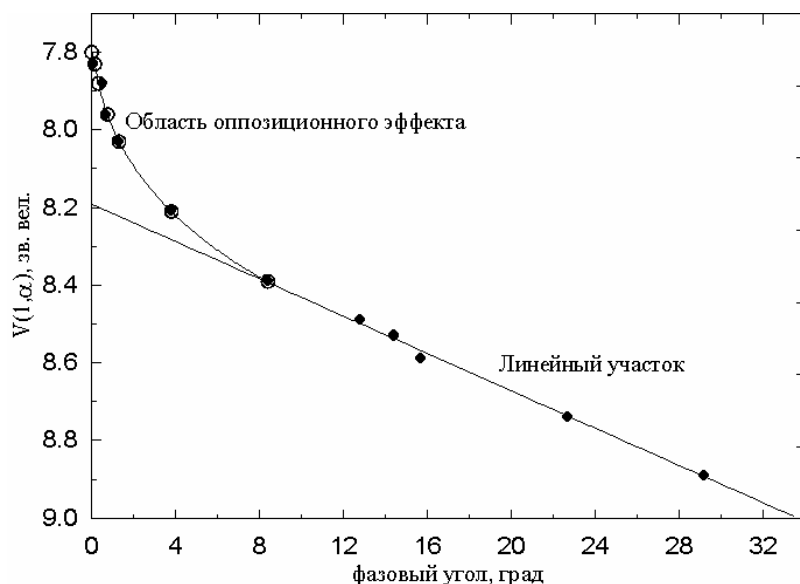


Рис. 5. Фазовая зависимость блеска астероида 79 Эвринома, полученная на АО ХНУ В.Г.Шевченко.

гравитации на астероидных телах;

– менее зрелыми, то есть почти несодержащими стекол и агглютинатов, характерных для лунного реголита;

– более грубозернистыми, так как тонкая фракция реголита легче теряется астероидами в процессе ударной переработки;

Структура поверхностей АСЗ в принципе может отличаться от астероидов главного пояса, прежде всего из-за значительного различия в гелиоцентрических расстояниях и, возможно, из-за различий в интенсивностях столкновительных процессов. Сравнение средних значений различных оптических характеристик поверхностей S-астероидов из главного пояса и сближающихся с Землей [6] показало, что по альбедо, цвету, параметрам фазовых кривых блеска и поляризации астероиды этих двух популяций практически не отличаются друг от друга. С другой стороны, некоторые АСЗ не удовлетворяют стандартной теплофизической модели и, вероятно, имеют тонкий слой (или вообще не имеют) реголита. Таким образом, можно заключить, что в среднем нет существенных различий в структуре поверхностей АСЗ и астероидов главного пояса. По-видимому, даже АСЗ километровой размера имеют реголит на своих поверхностях. Однако, как показывают радарные наблюдения, поверхности АСЗ являются более шероховатыми в шкале дециметров и метров.

7. О ПРОИСХОЖДЕНИИ АСТЕРОИДОВ

Самой первой гипотезой о происхождении астероидов, как известно, была гипотеза немецкого астронома Ольберса, которая предполагала образование астероидов в результате взрыва (распада) одной большой планеты. Она просуществовала более 150 лет, однако была отвергнута специалистами, поскольку вступила в противоречие с имеющимися данными о распределении в пространстве орбит астероидов, об изменении химсостава астероидов с гелиоцентрическим расстоянием, с данными о метеоритах, о дефиците массы вещества для планеты-родоначальницы, с трудностями объяснения физики (причин) самого взрыва и т.п.

В настоящее время общепризнанной является теория аккумуляции планет из вещества допланетного облака, основанная на гипотезе О.Ю.Шмидта, и получившая дальнейшее свое развитие в трудах московской школы космогонистов. Согласно этой теории процесс аккумуляции вещества в зоне астероидов не привел к образованию отдельной планеты, а остановился на промежуточной стадии из-за возмущающего действия тел, находящихся в соседней зоне Юпитера. В этой зоне из-за температурных условий начиналась конденсация обильных летучих элементов, поэтому пространственная плотность вещества в твердом состоянии в зоне Юпитера оказалась в несколько раз выше, чем в соседней зоне астероидов. Таким образом, условия для возникновения гравитационной неустойчивости и более быстрого роста тел в зоне Юпитера были более благоприятными и, как результат, зародыш Юпитера оказался намного крупнее своих соседей. Когда он стал достаточно массивным ($\sim 10^{27}$ г), он значительно разогнал эксцентриситеты и относительные скорости остальных тел в своей зоне, которые начали залетать в зону астероидов. Сталкиваясь с последними, они большую часть их "вымели" за пределы зоны, а у остальных увеличили относительные скорости до современных значений (~ 5 км/с). Это привело к тому, что процесс роста астероидных тел замедлился, а затем полностью остановился, поскольку столкновения тел стали завершаться не их объединением, а дроблением [3, 7].

Хотя пояс астероидов имеет протяженность по гелиоцентрическому расстоянию всего около 2 а.е. (вместе с внешними астероидами групп Кибелы и Гильды), его локализация на границе областей планет земной группы и планет-гигантов, то есть на границе горячей и холодной зон допланетного облака, обусловила четкую последовательность в распределении типов вещества в зависимости от расстояния до Солнца (см., напр., [5]). Эта последовательность условно делит весь пояс астероидов на три широкие зоны: 1) внутренняя, в которой вещество астероидов испытало интенсивный разогрев, вплоть до расплавления и дифференциации; 2) средняя, в которой разогрев вещества был менее интенсивный, но достаточный для освобождения воды и обеспечения низкотемпературного водного метаморфизма и 3)

внешняя зона примитивного безводного вещества, в которой тела не испытали постаккреционного нагрева, достаточного для расплавления водяного льда, а его потеря могла произойти путем сублимации. Во внутренней зоне ($r=2,2-2,7$ а.е.) преобладают астероиды типов S, M, E, A, V, R, представляющие тугоплавкое вещество (силикаты, металлы); в средней – низкоальбедные C, B, G, F-типы, богатые летучими; а во внешней ($r>3,4$ а.е.) – наиболее примитивные P и D-типы. Такое зонирование находится в полном согласии с делением астероидов на три суперкласса: дифференцированные, метаморфические и примитивные [10].

Время жизни астероидов групп Амура, Аполлона и Атона, то есть астероидов, находящихся на нестабильных орбитах, сближающихся с земной, является относительно коротким и составляет $\sim 10^6-10^7$ лет. Поскольку эта популяция астероидов все же существует, то должно происходить постоянное ее пополнение новыми объектами. Считается общепризнанным, что источниками пополнения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), являются астероиды главного пояса и ядра комет, исчерпавших свою активность. При этом все больше данных свидетельствуют о том, что главный пояс астероидов является доминирующим источником пополнения АСЗ, то есть последние являются фрагментами астероидов главного пояса, перешедшими на современные орбиты. Такие данные получены главным образом на основе теоретических исследований динамики АСЗ и численного моделирования их орбитального движения.

А какую же информацию о происхождении АСЗ можно получить на основе изучения их физических свойств? Используя имеющиеся наблюдательные данные было проведено сравнение физических свойств АСЗ и астероидов главного пояса. Результаты этого анализа [6] сводятся к тому, что малые размеры АСЗ, почти одинаковый при сравнении с астероидами главного пояса набор таксономических классов и спектров отражения, относительная распространенность S и C-типов, в среднем одинаковые форма и осевое вращение, оптические свойства и структура поверхностей – все это убедительно свидетельствует о том, что доминирующим источником пополнения АСЗ-популяции является главный пояс астероидов. С другой стороны, обнаружение нескольких астероидов, которые позже были отождествлены с угасшими кометами, указывает на возможное кометное происхождение некоторых из них.

Анализ данных показывает, что кандидаты на кометное происхождение должны, как правило, удовлетворять следующим основным требованиям: а) быть низкоальбедными астероидами D, P и C-типов; б) иметь более медленное вращение по сравнению со средним значением, характерным для АСЗ; в) находиться на нестабильных орбитах и быть связанными с метеорными потоками. Имеющиеся данные по классификации, параметрам вращения и формы АСЗ, а также данные о возможной связи их с метеорными потоками показывают, что не более 10% этих объектов удовлетворяют отмеченным требованиям. Наиболее вероятными кандидатами среди АСЗ на кометное происхождение являются астероиды 2100 Ра-Шалом, 2101 Адонис, 2201 Олято, 2212 Гефест, 3200 Фаэтон, 3552 Дон Кихот и 4015 Вильсон-Харрингтон.

Таким образом, анализ физических свойств астероидов, сближающихся с Землей, позволяет заключить, что основным источником их пополнения является главный пояс астероидов, а доля АСЗ кометного происхождения не превышает 10%. Этот вывод согласуется с результатами рассмотрения данной проблемы с точки зрения динамики, согласно которым главный пояс астероидов может обеспечивать пополнение АСЗ несколькими сотнями километровых объектов на протяжении 1 млн. лет, что является вполне достаточным для поддержания АСЗ-популяции [28].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в США и в наиболее развитых европейских странах наблюдается новый подъем в исследованиях астероидов, связанный с осознанием необходимости решения прежде всего проблемы астероидно-кометной опасности. Несмотря на большие успехи в изучении астероидов космическими средствами (Космический телескоп Хаббла, миссии "Галилео" и NEAR), которые получили детальную информацию о поверхностях, форме, магнитных полях, наличии спутников и пр. астероидов 243 Ида,

253 Матильда, 433 Эрос и 951 Гаспра, наземные исследования астероидов остаются основным источником информации о физических свойствах многих сотен астероидов. Космические исследования отдельных астероидов с высоким разрешением хорошо дополняют наземные наблюдения и, наоборот, наземные наблюдения дополняют качественно новые данные космических исследований статистической информацией о всей популяции астероидов в целом.

В качестве основных задач исследований физических свойств астероидов на ближайшую перспективу можно назвать следующие:

- разработка методов дистанционной оценки содержания металла в поверхностных слоях М-астероидов;
- проведение радарных, фотометрических, поляриметрических и спектральных наблюдений астероидов групп Атона, Аполлона и Амура в широком диапазоне фазовых углов с целью определения их физических характеристик;
- исследования спектральной зависимости параметров поляризации астероидов разных типов для изучения состава и строения астероидных поверхностей и разработки теории поляризации света поверхностями безатмосферных космических тел;
- накопление наблюдательных данных о параметрах вращения астероидов и их статистический анализ для объяснения происхождения обратного вращения, распределения астероидов по скоростям вращения, эволюции астероидного вращения во времени, феномена «космогонический диаметр» и др.
- создание Банка данных АСЗ, содержащего все имеющиеся данные о физических свойствах астероидов, сближающихся и пересекающих орбиту Земли. Такой Банк необходим прежде всего для решения чрезвычайно важных прикладных проблем, о которых говорилось во Введении.

1. Акимов Л.А., Лупишко Д.Ф., Бельская И.Н. // *Астрон. журнал.*–Т. 60, 1983.– Вып. 5.–С. 999-1004.
2. Акимов Л.А., Лупишко Д.Ф., Шевченко В.Г. // *Астрон. вестник.*–Т. 26, 1992.– № 4.–С. 62-67.
3. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. *Планеты земной группы.*–М.: Наука, 1990.–296 с.
4. Лупишко Д.Ф. *Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных.* Докт. дисс. Харьков, 1998.–245 с.
5. Лупишко Д.Ф., Бельская И.Н. // *Астрон. вестник.*–Т. 25, 1991.– № 1.–С. 5-26.
6. Лупишко Д.Ф., Лупишко Т.А. // *Астрон. вестник.*–2000 (в печати).
7. Сафронов В.С. *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет.* –М.: Наука, 1969.–244 с.
8. Шевченко В.Г. *Фотометрия астероидов: фазовые зависимости блеска, фотометрическая модель:* Дис.канд. физ.-мат. наук: 01.03.03. Харьков, 1997.–156 с.
9. Шевченко В.Г., Лупишко Д.Ф. // *Астрон. вестник.*–Т. 32, 1998.–№ 3.– С. 50-263.
10. Bell J.F. // *Meteoritics.*–V. 2, 1986.–P. 333-334.
11. Belton M.J.S., Chapman C.R., Thomas P.C. et al. // *Nature.*–V. 374, 1995.–P. 785-788.
12. Binzel R.P., Farinella P., Zappala V., Cellino A. // *Asteroids II.* (Eds.: R.Binzel, T.Gehrels, M.Matthews) Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.–P. 416-441.
13. Busarev V.V. // *Icarus.*–V. 131, 1998.–No. 1.–P. 32-40.
14. Dollfus A., Mandeville J.C., Duseaux M. // *Icarus.*–V. 37, 1979.–No.1.–P. 124-132 .
15. Farinella P., Davis D.R., Marzari F., Vokrouhlicky D. *Collisional evolution of asteroids.* (Eds. J.Svoren, E.M. Pittich, and H.Rickman) *Proceed. IAU Coll. 173. Evolution and Source Regions of Asteroids and Comets.* Astron. Inst. Slovak Acad. Sci., Tatranska Lomnica, 1999.–P. 129-144.
16. Gradie J. C., Chapman C.R., Tedesco E.F. *Asteroids II* (Eds. R.P.Binzel, T.Gherels, M.S. Matthews), Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.–P. 316-335.
17. Harris A.W. *Asteroids, Comets, Meteorites II* (Eds. C.-I.Lagerkwist et al.), Uppsala Univ., 1985.–P. 35-44.
18. Harris A.W. // *Icarus.* V. 40, 1979.–No. 1.–P.145-153.
19. Hilton J.L., Seidelmann P.K., Middour J. // *Astron. J.*–V. 112, 1996.–No. 5.–P. 2319-2329.
20. Hoffmann M. *Asteroids II* (Eds. R.P.Binzel, T.Gherels, M.S. Matthews), Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.–P. 228-239.
21. Holman M., Wisdom J. // *Bull. Americ. Astron. Soc.*–V. 26, 1994.–P. 1168.
22. Hughes D.W. // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 1982, Vol. 199, P. 1149-1157.
23. Jones T.D., Lebofsky L.A., Lewis J.S., Marley M.S. // *Icarus.*–V. 88, 1990.–No. 1.– P. 172-192.
24. Lupishko D.F., Belskaya I.N. // *Icarus.*–V. 78, 1989.–No 2.–P. 395-401.
25. Lupishko D.F., Di Martino M. // *Planet. Space Sci.*–V. 46, 1998.–P. 47-74.

26. Marzari F., Farinella P., Davis D.R. // *Icarus*.—V. 142, 1999.—No.1 —P. 63-77.
27. McBride N., Hughes D.W. // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 1990, Vol. 244, P. 513-520.
28. Menichella M., Paolicchi P., Farinella P.// *Earth, Moon, and Planets*.—V. 72, 1996.— P. 133-149.
29. Morrison D. Report of the NASA International Near-Earth Object Detection Workshop, JPL, California, 1992.—63 p.
30. Rivkin A.S., Howell E.S., Britt D.T. et al. // *Icarus*.—V. 117, 1995.—No. 1.—P. 90-100.
31. Schubart J., Matson D.L. *Asteroids* (Ed. T.Gehrels), Tucson: Univ. of Arizona Press, 1979.—P. 84-97
32. Sitarski G., Todorovic-Juchniewicz B. // *Acta Astronomica*.—V. 45, 1995.—P. 673-677.
33. Tedesco E.F., Veeder G.I. The IRAS Planet Survey (Eds. E.F.Tedesco et al.), Phillips Labor. Final Report No PL-TR-92-2049, 1992.—P. 243-285.
34. Tholen D.J. Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry. Ph. D. Thesis, Univ. of Arizona, 1984.—150 p.
35. Veverka J., Thomas P.C., Bell J.F. et al. // *Science*.—V. 285, 1999a.—P. 562-564.
36. Veverka J., Thomas P.C., Harch A. et al. // *Icarus*.—V. 140, 1999b—No. 1.—P. 3-16.
37. Wisdom J. // *Nature*.—V. 315, 1985.—P. 731-733.
38. Zappala V., Cellino A., Di Martino M. et al. // *Icarus*.—V. 129, 1997.—No. 1.—P. 1-20.
39. Zappala V., Cellino A., Gladman B.J. et al. // *Icarus*.—V. 134, 1998.—No. 1.—P. 176-179.

Поступила в редакцию 21.05.2000