

Введение

В данной работе собраны сведения обо всех известных к настоящему времени потенциально опасных астероидах и кометах. Под этим термином понимаются космические тела, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний меньших или равных 0.05 а.е. и абсолютная звездная величина которых не превышает 22.0. Если принять среднее значение альбедо астероидов равным 0.13, то этому условию соответствуют тела, превышающие 150 метров в поперечнике. Считается, что тела меньшей величины не представляют серьезной угрозы для Земли, поскольку они в большинстве случаев сильно разрушаются при прохождении через атмосферу и в состоянии причинить лишь локальный ущерб. Напомним, что астрономическая единица длины, сокращенно а.е., приближенно равна среднему расстоянию Земли от Солнца, что составляет 1.5×10^8 км. Предельное значение в 0.05 а.е. для минимального расстояния орбиты космического тела и Земли также является достаточно условным, но оно оправдано тем обстоятельством, что в таких пределах можно ожидать изменения расстояния между орбитами угрожающего тела и Земли в обозримом будущем под влиянием периодических и вековых возмущений, а также других факторов, включая неточность определения первоначальной орбиты тела и ее прогнозирования. Во всяком случае, подобные тела заслуживают пристального внимания наблюдателей и теоретиков и аккуратного отслеживания изменения их орбит в будущем.

Конечно, уменьшение взаимного расстояния между орбитами до нуля или почти до нуля еще не означает, что тело обязательно столкнется с Землей. Столкновения оказываются возможными только в том случае, когда в момент прохождения тела через один из узлов его орбиты на плоскости эклиптики (плоскости орбиты Земли) Земля оказывается на достаточно близком расстоянии от этого узла (рис. 1).

Так как экваториальный радиус Земли составляет всего 6378 км, а длина земной орбиты около одного миллиарда километров, то при несоизмеримости периода обращения тела с годом вероятность почти одновременного прохождения Земли и тела через узел его орбиты на эклиптике составляет величину около одной стотысячной. Прежде чем реальное столкновение состоится, орбита тела может измениться в результате тесного сближения с Землей или орбиты Земли и тела разойдутся на достаточно далекое расстояние из-за движения перигелиев и узлов орбит, характерных для тел Солнечной системы (рис. 2).

Фактическое пересечение орбит Земли и известных малых планет неоднократно случалось в прошлом. Так, например, орбита малой планеты (2201) Oljato пересекала орбиту Земли в середине 1962 года, орбита малой планеты (16960) 1998 QS₅₂ пересекалась с орбитой Земли в начале 1991 го-

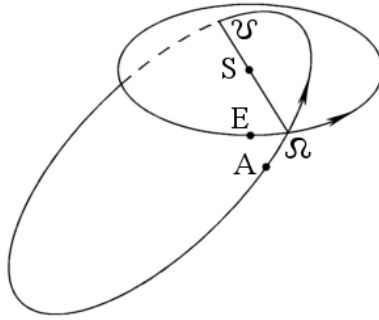


Рис. 1. Расположение узлов орбиты астероида на плоскости орбиты Земли. Для того чтобы подчеркнуть пространственный характер рисунка, области, ограниченные эллипсами, рассматриваются как непрозрачные; скрытые от читателя части орбит обозначены пунктиром

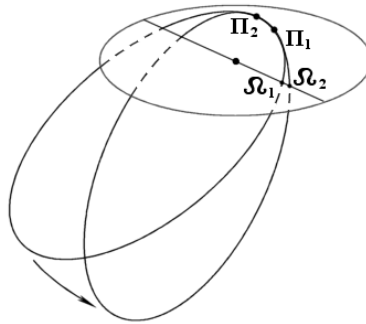


Рис. 2. Изменение положения орбиты тела по отношению к орбите Земли в результате движения перигелия. Π_1, Ω_1 — перигелий и восходящий узел в эпоху t_1 . Π_2, Ω_2 — перигелий и восходящий узел в эпоху t_2 . Участки орбиты тела, расположенные под плоскостью эклиптики в пределах орбиты Земли, обозначены пунктиром

да, а орбита малой планеты (37638) 1993 VB с 1971 г. по 2000 г. семь раз пересекла орбиту Земли, как это показывают расчеты ее эволюции.

Для потенциально опасных тел в основных таблицах (табл. 1, 3 Приложения) приводится ряд параметров, которые, с одной стороны, характеризуют его орбиту и ту точность, с которой она известна в настоящее время, с другой, дают представление о его размерах, физических свойствах и энергии столкновения с Землей, если бы оно произошло. Данные, включенные в таблицы, могут быть использованы как справочный материал, для статистических исследований, а также как «информация к размышлению». Таблицам предшествует достаточно подробное, разбитое на отдельные параграфы описание сведений, включенных в таблицы, имеющее самостоятельный интерес

для первоначального ознакомления с предметом.

Поскольку данные таблицы могут использоваться специалистами различных областей знаний, изложение астрономических сведений ведется в основном на уровне, доступном непрофессионалам.

В ближайших параграфах рассмотрены сведения, относящиеся к малым планетам.

1. Открытие малых планет. Нумерованные и нenumерованные малые планеты. Предварительные обозначения. Служба малых планет

Помимо девяти больших планет вокруг Солнца обращается бесчисленное количество астероидов (малых планет), комет и метеороидов, которые принято называть малыми телами Солнечной системы. В результате действия различных сил гравитационного и негравитационного происхождения их орбиты подвержены довольно быстрым по сравнению с возрастом Солнечной системы изменениям, что приводит к столкновению этих тел друг с другом, с большими планетами и их спутниками, выпадению малых тел на Солнце или выбросу их из Солнечной системы. Часть этих тел, движущихся по орбитам, сближающимся с земной, представляют угрозу для Земли и ее обитателей, которую называют астероидно-кометной опасностью.

В отличие от больших планет, известных людям с глубокой древности, малые планеты были открыты сравнительно недавно, чуть более 200 лет тому назад. Еще Кеплер, открывший фундаментальные законы движения планет, в конце XVI века обратил внимание на то, что между орбитами Марса и Юпитера имеется необычно широкий пробел. Во второй половине XVIII была найдена эмпирическая формула для средних расстояний планет от Солнца (правило Тициуса-Боде), в соответствии с которой на расстоянии 2.8 а.е. от Солнца вокруг него должна обращаться неизвестная планета. Уверенность в ее существовании еще более укрепилась после открытия в 1781 г. В. Гершелем планеты Уран, седьмой по счету большой планеты Солнечной системы, расстояние которой от Солнца также удовлетворяло правилу Тициуса-Боде. Был даже разработан проект поиска неизвестной планеты, но открыта она была случайно одним из участников проекта, до которого сообщение о его включении в отряд «небесной полиции» для поимки незнакомки еще не успело дойти. 1-го января 1801 г. Джузеппе Пиацци (Палермо, Сицилия) во время наблюдений обнаружил неизвестный объект седьмой звездной величины, который отсутствовал в проверявшемся им звездном каталоге. Первоначально Пиацци принял объект за новую комету, но поскольку при дальнейших наблюдениях объект не проявлял характерной для комет изменчивости вида, Пиацци стал подозревать, что он открыл нечто более значительное. Пиацци продолжал наблюдения открытого им небесного тела до 11 февраля, после

чего вынужден был прекратить их из-за болезни. Посланные им сообщения о новом открытии дошли до других астрономов, когда продолжение наблюдений стало невозможным из-за малого углового расстояния объекта от Солнца.

Уже первые попытки определения приближенной орбиты нового небесного тела показали, что его среднее расстояние от Солнца почти в точности удовлетворяет правилу Тициуса-Боде. У современников появилась убежденность, что найдена недостающая планета Солнечной системы. Правда, из оценок ее блеска следовало, что новая планета имеет размеры гораздо меньшие, чем другие планеты, но это никого не смущало. Открытая планета была названа Пиацци Церерой Фердинандовой в честь небесной покровительницы Сицилии и короля Неаполитанского и Сицилии Фердинанда, однако уже современники признали за новой планетой только первую часть ее имени.

Церера была переоткрыта спустя год после ее открытия вблизи того места на небе, которое было предвычислено К.-Ф. Гауссом, блестяще решившим задачу определения орбиты Цереры по наблюдениям, выполненным Пиацци. Спустя еще три месяца, Г. Ольберс открыл во время наблюдений Цереры еще одну планету, названную Палладой. Согласно вычислениям Гаусса, Паллада оказалась расположенной почти на том же расстоянии от Солнца, что и Церера. В 1804 г. Гардинг и в 1807 г. все тот же Ольберс открыли еще две малых планеты — Юнону и Весту. Так было положено начало изучению нового класса небесных тел — малых планет Солнечной системы.

По предложению Гершеля, вновь открываемые малые планеты стали именоваться астероидами, или звездopodobными, поскольку в телескопы у них невозможно было обнаружить видимые диски, характерные для больших планет. Тем не менее, наименование «малые планеты» продолжает использоваться в применении к этим телам наряду с «астероидами».

К 1850 г. уже было открыто 13 малых планет, движущихся в той же области пространства. Малые планеты вызывали большой интерес и активно наблюдались. Поэтому удавалось по наблюдениям в одной оппозиции уверенно определить орбиту и установить принадлежность открытого объекта к малым планетам¹.

До середины XIX века открываемым малым планетам сразу давались имена, не присваивая номер. С начала 50-ых годов сразу после сообщения об открытии малой планете стали присваивать номер, а потом уже имя.

В 1869 г. впервые были получены наблюдения малой планеты, для которой не удалось определить элементы орбиты и которой поэтому не при-

¹Оппозицией называют взаимную конфигурацию Земли, Солнца и планеты, когда геоцентрические долготы Солнца и планеты отличаются на 180° ; вблизи оппозиции складываются как правило наилучшие условия для наблюдений, поскольку расстояние планеты от Земли и ее угол фазы оказываются минимальными, а блеск максимален; планета достигает наибольшей высоты над горизонтом около полуночи; в настоящее время для малых планет термин «оппозиция» понимается как оппозиция по прямому восхождению

Таблица 1. Кодировка предварительного обозначения малой планеты в зависимости от полумесяца, в котором произошло открытие.

Буква	Интервал	Буква	Интервал
A	январь 1–15	N	июль 1–15
B	январь 16–31	O	июль 16–31
C	февраль 1–15	P	август 1–15
D	февраль 16–29	Q	август 16–31
E	март 1–15	R	сентябрь 1–15
F	март 16–31	S	сентябрь 16–30
G	апрель 1–15	T	октябрь 1–15
H	апрель 16–30	U	октябрь 16–31
J	май 1–15	V	ноябрь 1–15
K	май 16–31	W	ноябрь 16–30
L	июнь 1–15	X	декабрь 1–15
M	июнь 16–30	Y	декабрь 16–31

своими постоянными номерами. Впоследствии подобные случаи происходили все чаще. После введения фотографического метода наблюдений малых планет в 1891 г. количество вновь открываемых малых планет резко возросло. Следить за ними становилось все труднее. С 1892 г. каждая открытая малая планета стала получать сначала предварительное обозначение, которое состояло из года открытия и одной, а потом и двух букв, дающих информацию о времени открытия в пределах года. Только после того как орбита малой планеты определялась надежно и появлялась уверенность в том, что продолжение наблюдений в последующие оппозиции можно будет обеспечить, планета получала постоянный номер. До 1925 г. не существовало общепринятой всеми наблюдателями системы предварительных обозначений, что вносило путаницу при использовании наблюдений для вычисления орбит и при отождествлении малых планет.

В 1925 г. Е. Боуер предложил систему предварительных обозначений, которая действует по настоящее время. В этой системе предварительное обозначение состоит из года открытия и двух букв латинского алфавита. Первая буква соответствует номеру полумесяца, в котором планета была открыта (таблица 1). Поскольку для кодировки достаточно иметь 24 символа, буквы I и Z не используются. Вторая буква в обозначении соответствует порядковому номеру открытия малой планеты в данном полумесяце (при этом исключается только буква I, т.е. вторая буква может принимать 25 значений). Если в течение полумесяца было открыто более 25 новых малых планет, то вторая буква обозначения вновь пробегает значения от A до Y, но к ним добавляется индекс 1. Если число планет больше 50, то добавляется индекс 2 и т.д. Например, 25-ая по счету планета, открытая во второй половине июля 1999 г., получила обозначение 1999 OZ, 26-ая — 1999 OA₁, 27-ая — 1999 OB₁ и т.д.

В настоящее время, когда интенсивность наблюдений необычайно возросла, предварительные обозначения некоторых малых планет включают двух и даже трехзначные индексы.

Для того чтобы малая планета могла быть найдена и отождествлена в последующих оппозициях, требуется заранее предвычислить таблицу ее видимых положений на небе в определенные моменты времени, т.е. требуется вычислить ее эфемериду. Ошибки, связанные с определением орбиты по не вполне точным наблюдениям, и не вполне точный учет возмущений, вызываемых притяжением со стороны больших планет Солнечной системы, приводят к уменьшению точности предвычисления положений тел, причем по мере удаления от эпохи, в которую были найдены первоначальные элементы орбиты, ошибки эфемериды возрастают. В результате малая планета может быть не найдена или неправильно отождествлена. С ростом числа известных малых планет задача слежения за ними становилась все более трудоемкой. Чтобы справиться с нею, необходимо было создать регулярную службу малых планет, в задачу которой вошли бы сбор и публикация наблюдений малых планет, присвоение предварительных обозначений, а затем номеров и названий, уточнение орбит по имеющимся и новым наблюдениям, регулярное предвычисление эфемерид и их публикация. С середины второго десятилетия прошлого века подобная служба была организована на базе Берлинского вычислительного института. С 1915 г. этот Институт стал издавать ежегодник "Kleine Planeten", в котором регулярно публиковались элементы всех занумерованных малых планет и их эфемериды. После второй мировой войны Берлинский вычислительный институт прекратил существование. Для восстановления службы малых планет, разрушенной в результате войны, в Цинциннати (США, Огайо) в 1946 г. был создан Центр малых планет, который стал осуществлять ряд функций, ранее выполнявшихся Берлинским вычислительным институтом. В то же время функцию вычисления эфемерид и их публикации принял на себя Институт теоретической астрономии АН СССР в Ленинграде. Начиная с 1948 г., ИТА регулярно публикует ежегодник «Эфемериды малых планет», содержащий всю необходимую информацию для продолжения наблюдений занумерованных малых планет и элементы их орбит. В 1978 г. Центр малых планет переместился из Цинциннати в Кембридж (США, Массачусетс). В 1998 г. Институт теоретической астрономии вошел в состав Института прикладной астрономии РАН, а его функции по подготовке и изданию «Эфемерид малых планет» были переданы ИПА РАН.

Благодаря усилиям сотен наблюдателей и целенаправленной, хорошо организованной работе мировой службы малых планет количество занумерованных малых планет постоянно росло, а точность, с которой известны элементы их орбит, увеличивалась. Таблица 2 дает представление о том, как возрастало количество занумерованных малых планет в послевоенный

Таблица 2. Число занумерованных малых планет в ежегоднике ЭМП на соответствующий год.

Год	Число малых планет	Год	Число малых планет
1948	1563	1995	5791
1952	1568	1996	6160
1955	1597	1997	6678
1960	1630	1998	7316
1965	1651	1999	8058
1970	1746	2000	9709
1975	1813	2001	12656
1980	2095	2002	20957
1985	2958	2003	34992
1990	3936	2004	52224

период.

В последние годы этот рост принял экспоненциальный характер. В каталоге наблюдений Центра малых планет накоплено свыше 11 млн наблюдений более чем 200000 индивидуальных объектов, из которых свыше 50000 получили к настоящему времени постоянные номера.

2. Главный пояс астероидов. Пояс Эджеворта-Койпера

Как известно, гелиоцентрическая эллиптическая орбита планеты вполне характеризуется шестью элементами. Долгота восходящего узла орбиты Ω и наклон орбиты i определяют положение плоскости орбиты относительно эклиптики (рис. 3). Угловое расстояние перигелия от узла орбиты ω задает ориентацию орбиты планеты в плоскости орбиты. Большая полуось орбиты a и эксцентриситет e определяют размер (среднее расстояние от Солнца) и форму (вытянутость) орбиты. Наконец, средняя аномалия M задает положение планеты на орбите в определенный момент времени. Для дальнейшего важно также упомянуть такие характеристики орбиты как перигелийное расстояние q — минимальное расстояние от Солнца, связанное с a и e соотношением

$$q = a(1 - e),$$

и афелийное расстояние Q — максимальное расстояние от Солнца, связанное с a , e и q соотношениями

$$Q = a(1 + e) = q(1 + e)/(1 - e).$$

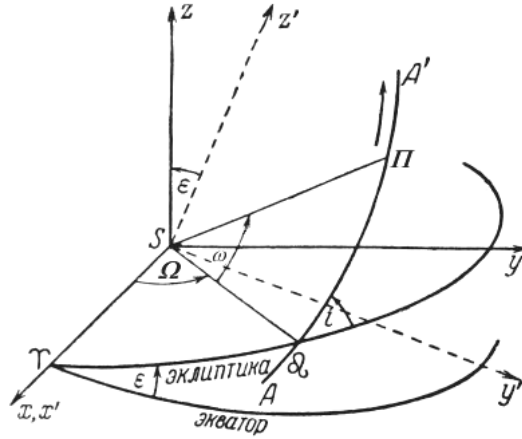


Рис. 3. Элементы орбиты астероида. x, y, z — прямоугольная эклиптическая система координат с началом в точке S (Солнце), x', y', z' — прямоугольная экваториальная система координат, Υ — точка весны, ε — наклон эклиптики к экватору, AA' — орбита планеты, Ω — восходящий узел орбиты на эклиптике, Ω — долгота восходящего узла, i — наклон орбиты, Π — перигелий, ω — угловое расстояние перигелия от узла.

Напомним также связь между большой полуосью планеты и ее средним движением n . Среднее движение — это угол, описываемый в средние сутки воображаемой точкой, движущейся вокруг Солнца с постоянной скоростью по окружности и совершающей полный оборот за период обращения тела. Среднее движение выражается в градусах/сутки или секундах дуги/сутки.

Если выражать большую полуось орбиты в астрономических единицах (а.е.), среднее движение в радианах в сутки, а массу Солнца принять за единицу, то согласно третьему закону Кеплера

$$a^3 n^2 = k^2, \quad (2.1)$$

где k — постоянная Гаусса, равная 0.01720209895. Если n выражать в секундах дуги в сутки, то

$$n = 3548.2a^{-3/2}.$$

Орбиты двух первых открытых малых планет Цереры и Паллады оказались расположенными между орбитами Марса ($a = 1.52$ а.е., $n = 1986.5''$) и Юпитера ($a = 5.20$ а.е., $n = 299.1''$) на среднем расстоянии от Солнца, равном 2.77 а.е. (в скобках указаны большие полуоси орбит и средние движения соответствующих больших планет). Дальнейшие открытия показали, что большие полуоси большинства представителей новой популяции тел ле-

жат в интервале от 2.1 а.е. (1166") до 3.3 а.е. (592"). Это так называемый главный пояс астероидов.

Ближе к Юпитеру расположены немногочисленные астероиды. Значения большой полуоси около 3.96 а.е. (450.2") имеют малые планеты группы Гильды, совершающие три оборота вокруг Солнца за время, пока Юпитер успевает совершить в точности два оборота (соизмеримость средних движений астероидов и Юпитера составляет $3/2$). Такой характер движения позволяет планетам этой группы постоянно находиться на достаточном удалении от Юпитера. На расстоянии 4.28 а.е. (400.8") от Солнца в соизмеримости $4/3$ с Юпитером движется малая планета Туле. Далее, на среднем расстоянии от Солнца, равном 5.2 а.е., располагаются троянцы — малые планеты, получившие имена в честь героев троянской войны. Соизмеримость их средних движений с Юпитером составляет $1/1$. При этом одна группа троянцев движется близко к его орбите примерно на 60° впереди Юпитера, а другая — на 60° позади. Возможность устойчивого движения подобного типа была теоретически рассмотрена Лагранжем за сто с лишним лет до открытия первого троянца.

Орбиты малых планет как правило мало наклонены к основной плоскости Солнечной системы — эклиптике, определяемой движением Земли вокруг Солнца. Проекция мгновенного положения малых планет на эту плоскость дает достаточно наглядное представление о расположении пояса астероидов относительно орбит больших планет (рис. 4).

На рисунке представлены только занумерованные малые планеты и притом только те, чьи афелльные расстояния не превышают 6 а.е.

Известны всего лишь около 40 малых планет с перигелиями за орбитой Юпитера, но большими полуосями орбит, меньшими чем у Нептуна. Почти все они были открыты недавно и получили общее родовое имя кентавры, поскольку некоторые из них проявляют черты двойственности: временами они обнаруживают кометную активность, связанную с испарением вещества. Характерным примером является кентавр Хирон ((2060) Chiron). Многие кентавры имеют весьма вытянутые орбиты (Фолус, Дамокл) и большие наклоны. Астероид (20461) Dioretsa имеет наклон к эклиптике 160° (большая полуось орбиты астероида равна 23.76 а.е., но перигелий орбиты лежит в главном поясе, и поэтому астероид не относится к кентаврам). Движение при наклоне свыше 90° считается обратным — происходящим по часовой стрелке, т.е. противоположным движению большинства тел Солнечной системы. Название Dioretsa навеяно как раз этой особенностью его движения, поскольку прочитанное справа налево оно совпадает с английской транскрипцией слова астероид.

В 1949 г. К. Эджеворт (K. Edgeworth), а в 1951 г. Г. Койпер (G. Kuiper) высказали предположение о существовании популяции небесных тел за орбитой Нептуна. В 1992 г. была открыта первая в этом внешнем поясе малая

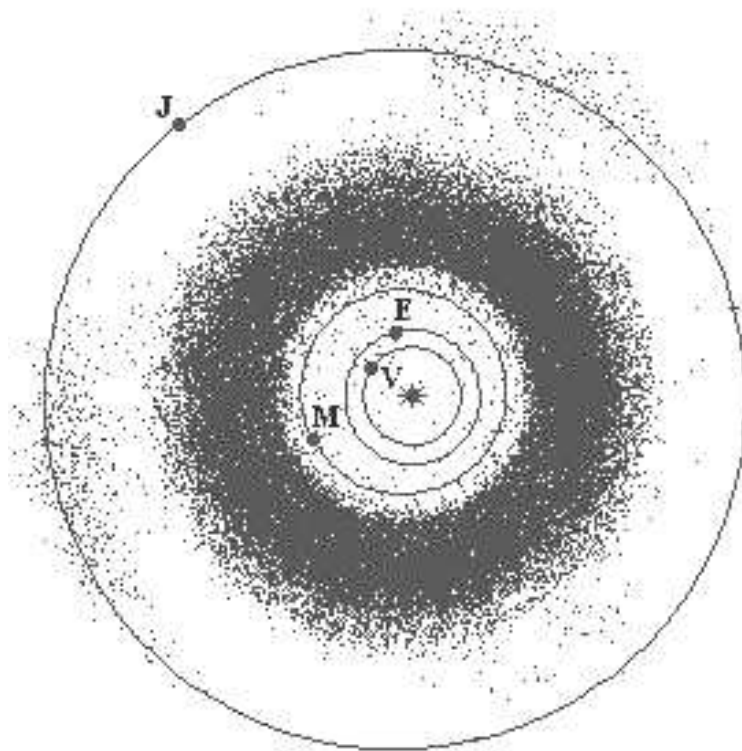


Рис. 4. Проекция мгновенного положения малых планет на эклиптику. Показаны орбиты Юпитера (J), Марса (M), Земли (E) и Венеры (V)

планета 1992 QB₁ ($a = 44$ а.е., $e = 0.08$, $i = 2^\circ$, диаметр $\simeq 200$ км). К настоящему времени известно около 750 объектов с большими полуосями орбит, большими чем у Нептуна. Новая популяция получила название пояса Эджеворта-Койпера. Количество открытых в этом поясе малых тел быстро увеличивается. Прогнозируется существование в области 30–50 а.е. нескольких десятков тысяч транснептуновых объектов с диаметрами более 100 км.

Многие транснептуновые объекты движутся в соизмеримости $2/3$ с Нептуном, подобно тому как это имеет место для Плутона, или в иных соизмеримостях. В некоторых отношениях Плутон является лишь одним, быть может, не самым крупным объектом пояса Эджеворта-Койпера и лишь в силу исторической традиции рассматривается как девятая большая планета Солнечной системы.

Помимо «классических» транснептуновых объектов, подобных 1992 QB₁ (сейчас (15760) 1992 QB₁), т.е. имеющих малый эксцентриситет и малый наклон орбиты, и объектов типа Плутона, находящихся в соизмеримости с Нептуном, за орбитой Нептуна обнаружены объекты на сильно вытянутых и иногда сильно наклоненных орбитах, образующие так называемый рассеян-

ный диск (scattered disk objects). Афелии орбит объектов рассеянного диска располагаются на расстояниях в десятки и сотни астрономических единиц от Солнца.

Кентавры, по-видимому, являются продуктами динамической эволюции объектов пояса Эджеворта-Койпера (Jewitt, 2002), образуя промежуточное звено между объектами этого пояса, скорее всего, объектами рассеянного диска, и короткопериодическими кометами семейства Юпитера или других внешних планет.

Близко к внутреннему краю главного пояса, но уже на заметном расстоянии от него находятся астероиды группы Венгрии (по имени первого открытого объекта этой группы). Их большие полуоси группируются около значения 1.93 а.е. Благодаря значительным эксцентриситетам орбиты некоторых малых планет, принадлежащих главному поясу или группе Венгрии, могут приближаться к орбите Марса и даже проникать внутрь ее. На рис. 5 показано распределение перигельных расстояний астероидов во внутренней по отношению к главному поясу части околосолнечного пространства. Хорошо заметно уменьшение числа малых планет по мере уменьшения их перигельных расстояний до радиуса орбиты Марса.

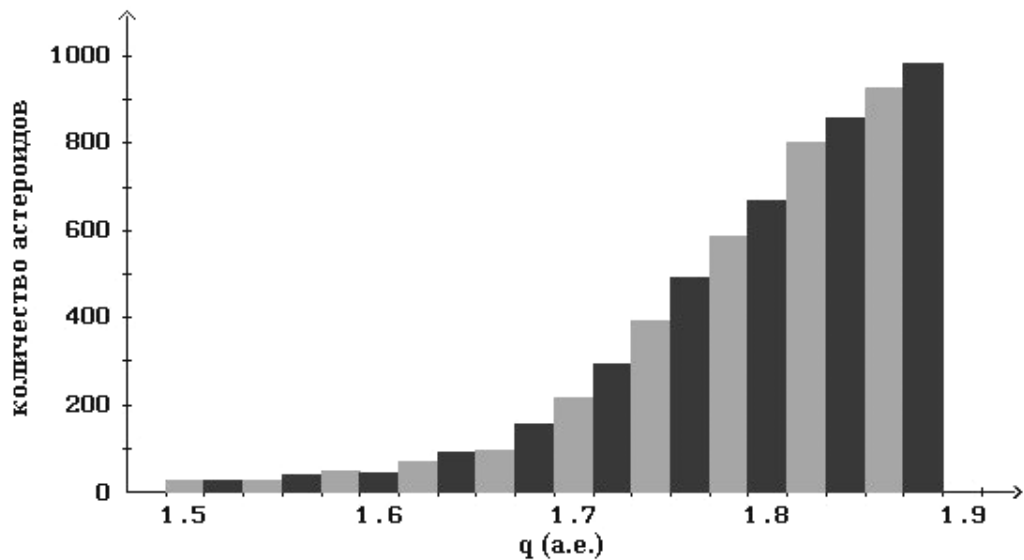


Рис. 5. Распределение занумерованных астероидов по величине перигельного расстояния в интервале 1.5–1.9 а.е.

3. Астероиды, сближающиеся с Землей

Астероиды с перигельными расстояниями, меньшими или равными 1.3 а.е., принято называть астероидами, сближающимися с Землей (АСЗ). Исторически первым из астероидов с такой орбитой был открыт (433) Eros (1898 г.). На рис. 6 в увеличенном масштабе по сравнению с предшествующим рисунком показано распределение перигельных расстояний занумерованных АСЗ.

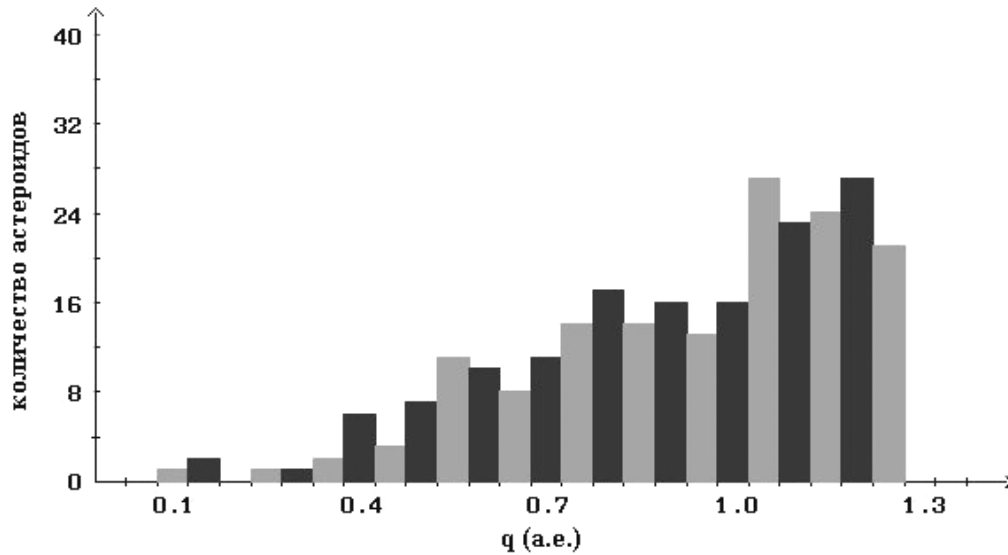


Рис. 6. Распределение занумерованных АСЗ по величине перигельного расстояния

Все АСЗ принято подразделять на несколько групп в зависимости от величины их перигельного или афельного расстояния и большой полуоси. Каждая такая группа именуется по имени астероида — ее характерного представителя.

Астероиды типа Амура ((1221) Amor). Перигельные расстояния q больше чем афельное расстояние Земли ($1.017 \text{ а.е.} < q \leq 1.3 \text{ а.е.}$). Астероиды этого типа могут приближаться к Земле извне, но не заходят внутрь орбиты Земли.

Астероиды типа Аполлона ((1862) Apollo). Перигельные расстояния меньше чем афельное расстояние Земли, большие полуоси больше чем у Земли ($a > 1 \text{ а.е.}, q \leq 1.017 \text{ а.е.}$). Астероиды этого типа могут проникать внутрь орбиты Земли.

Астероиды типа Атона ((2062) Aten). Большие полуоси меньше чем у Земли, афельные расстояния больше перигельного расстояния Земли ($a <$

1 а.е., $Q \geq 0.983$ а.е.). Орбиты астероидов этого типа лежат в основном внутри орбиты Земли и только в окрестности афелиев выходят за ее пределы.

Астероиды трех типов — Амура, Аполлона и Атона иногда называют ААА-астероидами. Помимо этих трех типов АСЗ в Солнечной системе, безусловно, существует еще один тип астероидов, способных приближаться к орбите Земли. Речь идет об астероидах, орбиты которых целиком лежат в пределах земной орбиты. Их часто именуют X-астероидами. Подобные малые тела трудно обнаружить, поскольку они могут наблюдаться только в утреннее или вечернее время, на элонгациях от Солнца, не превышающих 90° . Пока обнаружен только один достоверный представитель астероидов этого типа с $a = 0.757$ а.е., $e = 0.291$, $Q = 0.927$ а.е. (MPEC N 8072, 2003 Feb. 13).

Как уже было отмечено во Введении, из астероидов всех перечисленных групп выделяют потенциально опасные астероиды (ПОА) (Potentially Hazardous Asteroids). К ним относят все астероиды, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или равных 0.05 а.е., и абсолютная звездная величина которых не превышает 22.0. Потенциально опасные астероиды составляют примерно пятую часть всех АСЗ. Подобные тела заслуживают пристального внимания наблюдателей и теоретиков и аккуратного отслеживания изменения их орбит в будущем.

Значения минимальных расстояний между орбитами ПОА и Земли даны в таблице 1 Приложения (параметр MOID — Minimum Orbital Intersection Distance).

Классификация АСЗ приводится в таблице 3.

Надо отметить, что под влиянием планетных возмущений перигельные и афелийные расстояния астероидов, как и другие элементы орбит, испытывают постоянные изменения. При этом возможен переход астероидов из одного типа в другой. Однако темп этих изменений невелик и подобные переходы в обозримом будущем могут иметь место лишь для очень ограниченного числа астероидов.

В таблице 4 приводятся данные о количестве открытых АСЗ различных типов, количестве занумерованных объектов и число потенциально опасных объектов по состоянию на 27 марта 2003 г.

Принадлежность астероида к типу Аполлона или Атона не означает, что орбита астероида обязательно пересекает орбиту Земли: в большинстве случаев пересечение имеет место только в проекции на плоскость эклиптики, в пространстве орбиты лишь скрещиваются (рис. 2). Реальное пересечение двух орбит имеет место тогда, когда орбита Земли проходит через один или оба узла орбиты тела на эклиптике. Если при этом Земля и тело оказываются на своих орбитах одновременно в непосредственной близости к узлу, то происходит столкновение.

Движение ААА-астероидов совершается в такой области пространства, где оно не может быть устойчивым на длительных интервалах времени,

Таблица 3. Классификация АСЗ

Тип (русс./англ.) Сокращенное название	Описание	Область движения
Атонцы (Atens) At	АСЗ, пересекающие орбиту Земли, с большими полуосями, меньшими чем у Земли (названы по первому такому астероиду (2062) Aten)	$a < 1.0$ а.е. $Q \geq 0.983$ а.е.
Аполлонцы (Apollos) Ap	АСЗ, пересекающие орбиту Земли, с большими полуосями, большими чем у Земли (названы по первому открытому астероиду такого типа (1862) Apollo)	$a > 1.0$ а.е. $q \leq 1.017$ а.е.
Амурцы (Amors) Am	АСЗ с орбитами, лежащими вне орбиты Земли (названы по астероиду (1221) Amor)	$a > 1.0$ а.е. $1.017 < q \leq 1.3$ а.е.
X	АСЗ, орбиты которых полностью расположены внутри орбиты Земли	$a < 1.0$ а.е. $Q < 0.983$ а.е.
Потенциально опасные астероиды (Potentially Hazardous Asteroids — PHAs)	АСЗ, для орбит которых минимальное расстояние от орбиты Земли (MOID) составляет не более 0.05 а.е. (7 480 000 км), и чья абсолютная звездная величина $H \leq 22.0$. При принятом значении альбедо 0.13 это значение H соответствует диаметру 150 м	$MOID \leq 0.05$ $H \leq 22.0^m$

Таблица 4. Число открытых АСЗ и потенциально опасных астероидов

Тип	Всего открыто	Из них занумеровано	Потенциально опасные	Из них занумеровано
Атонцы	173	10	47	4
Аполлонцы	1152	145	424	62
Амурцы	937	148	22	5
X-астероиды	1	0	0	0
Всего	2263	303	493	71

если только какие-либо особые механизмы не поддерживают эту устойчивость. Перигелии и узлы орбит астероидов на плоскости эклиптики постоянно изменяются под влиянием планетных возмущений. При этом долготы перигелиев, как правило, прогрессивно возрастают, а узлы орбит движутся попятным образом, совершая полные обороты за периоды от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч лет. В результате этих изменений орбиты большинства ААА-астероидов периодически пересекаются с орбитами Марса, Земли и других планет. Вблизи эпох пересечения орбит возникает реальная угроза столкновения или тесного сближения астероида с большой планетой.

Теория взаимодействия астероидов с большими планетами при их сближениях впервые была разработана Эпиком (Örik, 1951). Наиболее вероятным результатом сближения является не столкновение, а трансформация орбиты малого тела. Характер трансформации зависит от обстоятельств сближения. В результате тесного сближения орбита малого тела может быть радикально изменена, вплоть до переброса тела на орбиту, пересекающую орбиту Юпитера, или выброса тела по гиперболической траектории за пределы Солнечной системы. Чаще всего хаотические блуждания малых тел между планетами заканчиваются их выпадением на Юпитер, Солнце или выбросом из Солнечной системы. Характерные времена жизни ААА-астероидов исчисляются от нескольких миллионов до десятков миллионов лет, что явно мало по сравнению со временем существования Солнечной системы. Поскольку популяция этих тел достаточно многочисленна в настоящее время, должен существовать постоянный источник (или источники), подпитывающий ее. Имеется много свидетельств в пользу того, чтобы считать пояс астероидов основным источником ААА-астероидов. Дополнительным источником могут являться периодические кометы, поверхностные слои которых за время многочисленных возвращений к Солнцу лишились летучих веществ, некогда входивших в их состав. Ядра подобных «выгоревших» комет, покрытые плотной пылевой коркой, могут наблюдаться как астероиды на характерных для комет вытянутых орбитах. По имеющимся оценкам, несколько процентов (до 10%) всех ААА-астероидов гинетически связаны с кометами (Лупишко и Лупишко, 2001).

Несмотря на очевидные соображения в пользу связи ААА-астероидов и метеоритов с поясом малых планет, пути миграции этих тел в район орбиты Земли в течение длительного времени оставались не вполне ясными. Дело в том, что для преобразования типичной орбиты тела в поясе астероидов в орбиту, пересекающую орбиту Земли, требуется достаточно большой импульс (приращение скорости в несколько километров в секунду). Столкновение тел в поясе не может сообщить такое приращение скорости достаточно большой массе.

Главный пояс астероидов — образование, имеющее сложную динамическую структуру. Эта структура в основном определяется силами, действу-

ющими на малые тела в этой области со стороны Солнца и больших планет. Особое влияние на поведение тел в поясе оказывают резонансные соотношения (соизмеримости) низких порядков ($2/1$, $3/1$, $4/1$, $5/2$, $7/3$) между средними движениями астероидов и Юпитера. В области между 2.1–3.3 а.е. им соответствуют люки — более или менее широкие интервалы среднего движения, где малые планеты совсем отсутствуют или плотность их распределения заметным образом понижена (рис. 7). Напротив того, ближе к Юпитеру соизмеримостям $3/2$, $4/3$, $1/1$ в распределении средних движений, как отмечалось в предыдущем параграфе, соответствуют концентрации (малые планеты группы Гильды, Туле, троянцы). Это различие между видимым проявлением резонанса с Юпитером в двух областях пространства оставалось загадочным на протяжении более ста лет со времени обнаружения неравномерности в распределении малых планет по большим полуосям. К концу XIX века были найдены семейства устойчивых периодических орбит в так называемой плоской круговой ограниченной проблеме трех тел (Солнце-Юпитер-астероид). Впоследствии были также построены пространственные решения для ряда соизмеримостей с Юпитером, с помощью которых можно было объяснить существование астероидов группы Гильды и Туле.

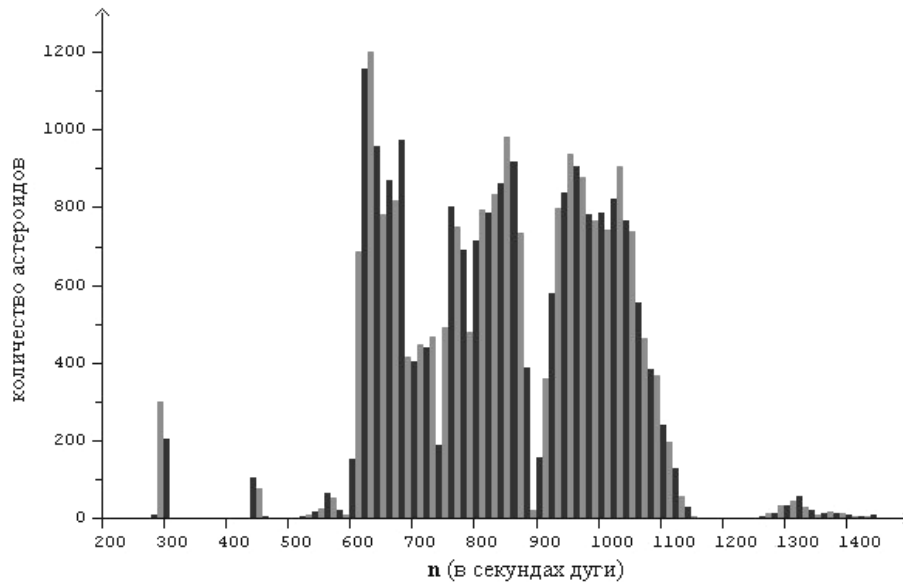


Рис. 7. Распределение малых планет по среднему движению в интервале $250'' < n < 1450''$. Соизмеримостям $2/1$ ($598''$), $3/1$ ($897''$), $4/1$ ($1196''$), $5/2$ ($748''$), $7/3$ ($698''$) с Юпитером соответствуют люки. Соизмеримостям $1/1$ ($299''$), $3/2$ ($449''$), $4/3$ ($399''$) соответствуют концентрации тел.

Для решения проблемы образования люков в прошлом веке было предложено много гипотез, но ни одна из них не могла считаться удовлетворитель-

ной. В последние два десятилетия, со времени появления работ (Wisdom, 1982, 1983), небесные механики связывают образование люков с наличием хаотических зон в окрестности резонансов с Юпитером. В таких зонах характер движения резко меняется в зависимости от от небольших изменений начальных условий движения, вследствие чего движение становится трудно предсказуемым на длительных интервалах времени. Как было показано Уисдомом при исследовании резонанса 3/1 с Юпитером ($a = 2.5$ а.е.), астероиды, попадающие в зону хаоса, испытывают нерегулярные колебания эксцентриситета, амплитуда которых может достигать 0.4, на характерных временах от нескольких десятков до нескольких сот тысяч лет (рис. 8). В результате, из-за уменьшения перигельного расстояния $q = a(1 - e)$ в периоды, когда эксцентриситет находится в окрестности максимальных значений, астероид приобретает возможность пересекать орбиту Марса. Впоследствии было показано, что в окрестности этого резонанса существует зона хаоса, где амплитуда колебаний эксцентриситета может достигать 0.9 и более (Ferraz-Mello et al., 1991). Под влиянием возмущений, испытываемых астероидом при сближениях с Марсом, он может перемещаться из одной зоны хаоса в другую. В итоге астероид приобретает возможность сближаться с Землей, Венерой и даже выпадать на Солнце, если его перигельное расстояние оказывается меньше радиуса последнего.

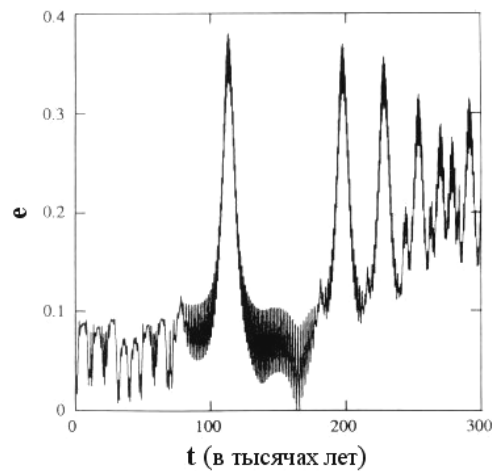


Рис. 8. Изменение эксцентриситета астероида в окрестности соизмеримости 3/1 с Юпитером с течением времени

Исследование резонанса 5/2 ($a = 2.82$ а.е.) привели к выводу, что и в этом случае действует аналогичный механизм, который способен приводить к существенному возрастанию эксцентриситетов (Šidlichovský and Melendo, 1986; Ipatov, 1992).

Сближение астероидов с планетами и Солнцем играет определяющую роль при образовании люков, поскольку резонансы изменяют эксцентриситеты и/или наклоны орбит астероидов, но не меняют их больших полуосей. Напротив того, сближение с планетой сообщает астероиду импульс, зависящий от взаимного расположения тел в момент сближения и массы планеты. В результате меняется большая полуось орбиты астероида, эксцентриситет и наклон. При этом астероид может покинуть резонансную зону, может случайно оказаться в зоне действия другого резонанса либо даже может быть выброшенным за пределы Солнечной системы, если сообщенная ему энергия окажется достаточной для преобразования его гелиоцентрической орбиты в параболу или гиперболу. Наиболее «драматическими» по своим последствиям оказываются сближения астероидов с Юпитером.

Таким образом, механизм увеличения эксцентриситета и последующего сближения астероидов с планетами решает проблему образования люков в поясе астероидов, с одной стороны, а с другой — указывает путь переброса вещества из пояса астероидов в район орбиты Земли. Нетрудно понять, что этот механизм приводит также к уменьшению числа астероидов с перигельными расстояниями, близкими к значениям больших полуосей орбит Марса, Земли, Венеры и Меркурия, что заметно на рисунках 5, 6.

Значительные возмущения в движении малых планет связаны также с резонансными соотношениями между скоростями движения перигелиев и узлов их орбит и скоростями движения перигелиев и узлов орбит возмущающих планет. Это так называемые вековые резонансы. Вековые резонансы ограничивают область фазового пространства, в котором располагаются элементы малых планет, а в ряде случаев рассекают ее на части. Вековые резонансы также причастны к перебросу вещества из пояса астероидов в область внутренних планет (Knežević, Milani, 1994). В частности, у внутреннего края главного пояса малых планет в окрестности значений большой полуоси $a = 2.1$ а.е. доминирует вековой резонанс ν_6 (совпадение средних скоростей движений перигелиев орбит астероида и Сатурна). Его расположение в поясе слабо зависит от эксцентриситета, но сильно зависит от наклона орбит: при наклонах, меньших 10° , он проходит в окрестности 2.1 а.е. При больших значениях наклона область его действия смещается в сторону увеличения больших полуосей (рис. 9).

Вблизи этого резонанса эксцентриситеты орбит астероидов систематически увеличиваются, вследствие чего астероиды приобретают возможность сближаться с внутренними планетами и выпадать на Солнце. Среднее время, потребное для превращения астероида на квазикруговой орбите в астероид, пересекающий орбиту Земли, составляет всего около 0.5 млн лет. В 80% случаев развитие событий заканчивается выпадением астероида на Солнце, в 12% случаев — выбросом астероида на гиперболическую орбиту в результате сближения с планетами, в особенности, с Юпитером, и только примерно в

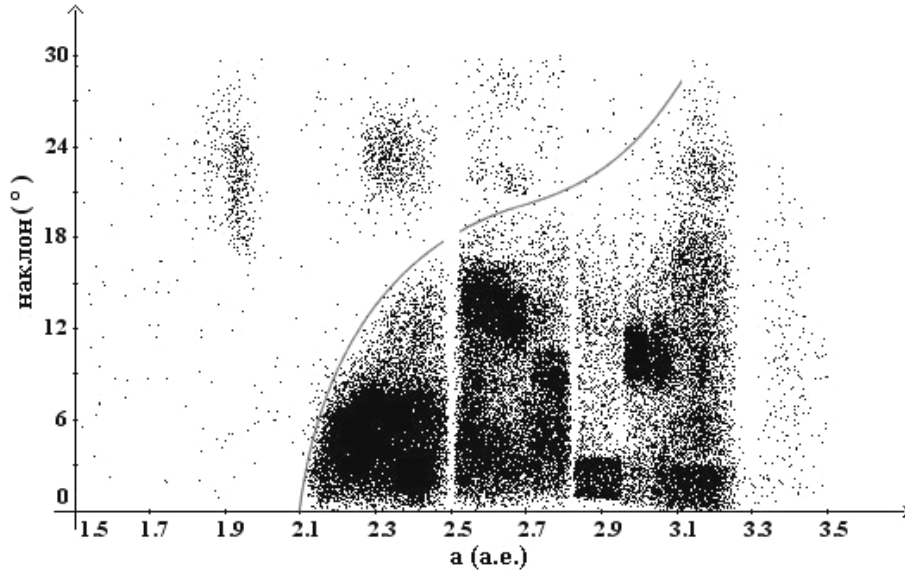


Рис. 9. Распределение малых планет в плоскости a, i . На фоне распределения четко выделяются люки вблизи значений большой полуоси 2.5 а.е. ($897''$), 2.82 а.е. ($748''$), 3.3 а.е. ($598''$). Тонкой сплошной линией показано расположение векового резонанса ν_6 , отделяющего планеты с большими наклонами от остальной части пояса. Хорошо заметна группа Венгрии (большие наклоны, значения большой полуоси, близкие к 1.93 а.е.) Заметны также концентрации точек, соответствующих семействам малых планет Фемиды, Эос, Корониды и др.

1% случаев — столкновением с Землей. На периферии области действия этого резонанса его эффект становится менее мощным, но все еще достаточным, чтобы позволить астероиду сближаться с Марсом в периоды наибольшего возрастания эксцентриситета (Morbidelli et al., 2002).

Вековой резонанс ν_6 является наиболее активным поставщиком астероидного материала в зону внутренних планет. Следующим по эффективности является резонанс 3/1 (2.52 а.е.). Но также как и в случае резонанса ν_6 подавляющая часть материала выпадает не на поверхности планет земной группы, а в конечном счете на Солнце (70%) или выбрасывается на гиперболические орбиты (28%). Вероятность падения на Землю составляет всего $2 \cdot 10^{-3}$.

В случае резонанса 5/2 (2.82 а.е.) «накачка» эксцентриситета происходит очень быстро, и астероидный материал уже за время порядка 300000 лет достигает района орбиты Земли. Но с другой стороны, в афелии орбита тела приближается к орбите Юпитера или даже оказывается в ее пределах. В силу этого до 92% материала выбрасывается на гиперболические орбиты,

8% попадает на Солнце и только около 0.03% в конце концов оказывается на Земле.

Хотя резонанс 2/1 (3.28 а.е.) способен доставлять некоторое количество материала в район орбиты Земли, средняя продолжительность существования тел на таких орбитах исчисляется всего сотней тысяч лет или около того, поскольку Юпитер быстро преобразует их орбиты в гиперболические. В итоге — вероятность столкновения с Землей оказывается крайне малой ($5 \cdot 10^{-5}$).

Помимо перечисленных наиболее мощных резонансов в поясе астероидов присутствует множество других резонансов, оказывающих менее существенное, но тем не менее заметное влияние на движение тел. Эти резонансы обусловлены соизмеримостями средних движений тел с Юпитером более высоких порядков (например, соизмеримостями 7/2, 7/3, 9/4, 10/3), соизмеримостями средних движений с Марсом, Землей, кратными соизмеримостями, когда резонансные соотношения связывают средние движения трех тел (например, Юпитера, Сатурна и астероида (Nesvorný et al., 1998)), а также разного рода вековыми резонансами. В результате этого большая часть главного пояса обнаруживает слабую хаотичность. Правда, эффект этой хаотичности невелик. Большие полуоси орбит колеблются в узкой окрестности резонансов, а эксцентриситеты и наклоны хаотически диффундируют в сторону увеличения. Эти процессы также способствуют транспортировке вещества из пояса астероидов в район движения планет земной группы, хотя темп ее крайне мал, от десятков миллионов до миллиардов лет.

Таким образом, в настоящее время в основном известны механизмы транспортировки астероидного вещества. Естественно возникает вопрос, каким образом происходит пополнение вещества в резонансных зонах пояса: без пополнения они давно были бы близки к полному истощению. Между тем, исследование распределения кратеров на поверхности Луны и Земли как будто бы свидетельствует об относительном постоянстве темпа бомбардировки этих тел астероидами, кометами и их обломками (Grieve and Shoemaker, 1994). Потенциальные источники должны обеспечивать более или менее равномерный приток вещества в резонансные зоны, притом в нужном количестве.

Легко допустить, что поставщиком вещества в резонансные зоны может являться постоянное дробление вещества астероидов в соседних с этими зонами областях пояса. Помимо этой составляющей в истории пояса имели место катастрофические столкновения тел, которые вели к образованию наиболее многочисленных семейств астероидов (Zappalá et al., 2002). Такие события также могли эпизодически вбрасывать астероидное вещество в резонансные зоны. Существует, однако, ряд наблюдательных фактов, которые противоречат столь простому объяснению рассматриваемой проблемы.

Начать можно с того, что согласно современным численным эксперимен-

там (Gladman et al., 1997), вещество, выброшенное в область действия наиболее мощных резонансов, очень быстро достигает района планет земной группы, где оно также не может существовать длительное время. В результате средняя продолжительность пребывания вещества в открытом космическом пространстве, вне тел, из недр которых оно было выброшено, до его попадания на Землю должна составлять всего лишь около десяти миллионов лет. Но эта оценка находится в явном противоречии с космическими возрастными метеоритов, надежно определяемыми по относительному содержанию изотопов, образующихся в их теле под воздействием космических лучей. Для каменных метеоритов эти возрасты лежат преимущественно в диапазоне 1–100 млн лет, с максимумами распределения в области 20 и 50 млн лет для разных групп метеоритов, а для железных — они составляют несколько сот млн лет с максимумом около 800–900 млн лет (Вуд, 1971).

Популяция астероидов, сближающихся с Землей, насчитывает около одной тысячи тел размером от одного километра и более, а с учетом тел, пересекающих орбиту Марса, число таких тел должно быть в несколько раз больше (5000–6000). Чтобы поддерживать эту популяцию в устойчивом состоянии требуется, чтобы в поясе астероидов постоянно происходили катастрофические столкновения, так как только при таких столкновениях образующиеся километровые тела могут получить достаточные по величине импульсы, чтобы достичь наиболее мощных резонансных зон. Но катастрофические столкновения относительно редкие события. Возраст семейств, по общему мнению, составляет от нескольких сот миллионов до нескольких миллиардов лет. Поскольку динамическое время жизни в окрестности мощных резонансов гораздо короче, память об этих событиях здесь давно стерлась. Катастрофические столкновения не являются непосредственным поставщиком тел километровых размеров в резонансные зоны.

К этому можно добавить, что распределение тел по размерам среди крупных ААА-астероидов имеет иной характер, чем это имеет место для осколков столкновений (показатель интегрального степенного распределения тел в зависимости от диаметра в первом случае равен -1.75 , в то время как для осколков можно ожидать значение около -3).

Так что же является основным поставщиком астероидного материала в резонансные зоны? Ответ на этот вопрос не вполне ясен на сегодняшний день. Наиболее правдоподобным ответом является эффект Ярковского. Суть его заключается в реактивном эффекте (эффекте отдачи), испытываемом нагретым телом в результате асимметричного переизлучения тепловой энергии.

Различают суточную и сезонную составляющие эффекта (Bottke et al., 2002). Суточная составляющая зависит от вращения тела вокруг оси, не лежащей в плоскости его орбиты. При этом из-за тепловой инерции вещества вечерняя половина тела оказывается более нагретой лучами Солнца по сравнению с утренней. Наиболее высокая температура поверхности достигается

не в полдень (не в подсолнечной точке), а в точке, чей местный меридиан повернут относительно меридиана подсолнечной точки на некоторый угол к востоку или западу в зависимости от направления вращения тела. Нагретое тело излучает тепло. Тепловые фотоны, покидая тело, сообщают ему некоторый импульс. Если бы температура поверхности сферически симметричного тела была всюду одинакова, то усредненный результирующий импульс был бы равен нулю. Из-за различия температур в различных точках, результирующий импульс не равен нулю, причем из-за вращения тела он направлен не в сторону, противоположную Солнцу, а под некоторым углом к этому направлению. Его действие совершенно аналогично реактивному эффекту истечения газов из ядра кометы при нагревании его солнечными лучами. В зависимости от направления вращения ядра по отношению к направлению орбитального движения эффект Ярковского, подобно негравитационному эффекту в движении кометы, может вызывать как ускорение орбитального движения тела (сокращение большой полуоси), так и замедление движения (увеличение большой полуоси).

Сезонная составляющая эффекта Ярковского связана с орбитальным движением тела и с неравномерностью нагрева летней и зимней половины тела, ось вращения которого сохраняет направление в пространстве, не перпендикулярное к плоскости его орбиты. Опять-таки из-за тепловой инерции вещества наибольший нагрев летнего полушария достигается не в момент летнего солнцестояния, а спустя некоторое время. Из-за этого результирующий реактивный импульс имеет составляющую, направленную в сторону, противоположную направлению движения тела. Как всякий тормозящий эффект, сезонный эффект Ярковского вызывает ускорение орбитального движения тела, т.е. сокращение его большой полуоси. В отличие от суточной составляющей сезонная составляющая не зависит от направления вращения.

Величина каждой составляющей эффекта Ярковского зависит от наклона оси вращения тела к плоскости его орбиты. Суточная составляющая максимальна, если ось вращения перпендикулярна к орбите и обращается в нуль, если ось вращения лежит в плоскости орбиты. Напротив того, сезонная составляющая обращается в первом случае в нуль и максимальна во втором. В реальности обе составляющие действуют совместно, производя тот или иной эффект. На крупные тела ($D > 20$ км) эффект не оказывает заметного действия за приемлемые промежутки времени. То же самое можно сказать и об очень малых телах, в которых устанавливается постоянная температура. Для тел промежуточных размеров величина эффекта зависит от теплопроводности вещества, в особенности для тел размером 0.1–1.5 м.

Как показывают расчеты, выполненные в различных предположениях относительно размеров тел, их теплопроводности и других параметров, эффект Ярковского может обеспечить изменение больших полуосей тел, движущихся в поясе астероидов, на величины порядка 0.1–0.01 а.е. за время существования

этих тел до их полного разрушения в результате катастрофических столкновений (от нескольких млн до примерно 2 миллиардов лет в зависимости от размеров).

Как было указано выше, космические возрасты каменных и железных метеоритов находятся в противоречии с динамическими оценками времени их доставки из пояса астероидов на Землю. Эффект Ярковского позволяет привести эти оценки в согласие друг с другом. Осколки дробления астероидов как правило не попадают непосредственно в области активно действующих резонансов, но в течение длительных интервалов времени дрейфуют в направлении тех областей, где они подхватываются резонансами для дальнейшей переправки в район планет земной группы. За время дрейфа они успевают заметным образом состариться, причем из-за большей теплопроводности железных тел время их дрейфа оказывается в среднем на порядок большим чем у каменных. Таким образом, эффект Ярковского дает естественное объяснение большим космическим возрастам вещества метеоритов и разнице возрастов каменных и железных тел.

Выше было также отмечено, что механизм катастрофических столкновений не может обеспечить равномерный приток тел километровых размеров в резонансные зоны и далее в район орбиты Земли. Напротив того, эффект Ярковского способен транспортировать тела до 20 километров в диаметре из соседних достаточно обширных областей пояса в те области, откуда они перебрасываются к планетам земной группы. Действие эффекта сказывается на протяжении десятков и сотен миллионов лет, причем по-разному на тела различных размеров и различного состава. В результате в резонансные зоны достаточно равномерно поставляются тела различных размеров и являющиеся продуктами дробления тел различного состава. Эти особенности эффекта позволяют объяснить и равномерный характер притока вещества на Землю, и разнообразие минералогического состава вещества метеоритов, и распределение АСЗ по размерам.

4. Фотографические, ПЗС и радиолокационные наблюдения

В комплексе проблем, связанных с астероидной опасностью, определение и уточнение орбит небесных тел является одной из центральных задач. Орбита небесного тела находится из его наблюдений. До недавнего времени большинство позиционных наблюдений небесных тел выполнялось фотографическим способом, когда изображение небесного тела сначала фиксируется на фотопластинке, а затем положение тела относительно опорных звезд измеряется с помощью того или иного прибора. На следующем этапе измеренные координаты объекта относительно опорных звезд и сферические координаты опорных звезд, выбираемые из каталога, используются для вычисления сферических координат объекта. Фотографический метод, обладающий рядом

достоинств, сопряжен с большими затратами труда и времени. За последние полтора десятилетия этот метод почти полностью оказался вытесненным новой технологией, основанной на использовании приборов с зарядовой связью, или ПЗС-матриц.

ПЗС-матрица представляет собой плоскую пластинку диэлектрика, покрытую светочувствительными элементами микронных размеров — пикселями, способными накапливать заряды под влиянием упавшего на них света. Оптическая система телескопа фокусирует на ПЗС-матрице изображение всех источников света, находящихся в определенном участке неба. Изображение светила обычно покрывает несколько пикселей. Заряды, образованные под действием света, автоматически считываются через определенные промежутки времени и попадают сначала в аналого-цифровой преобразователь, а затем в ЭВМ. При этом положение каждого пикселя относительно условного начала фиксируются в численном виде, и в дальнейшем координаты пикселей с изображением объекта могут быть определены относительно пикселей с изображениями опорных звезд. Переход от измеренных прямоугольных координат объекта к сферическим совершается таким же образом как и в фотографическом методе. Используемые при этом каталоги сферических координат опорных звезд хранятся в памяти ЭВМ. Применение ПЗС-матриц позволяет полностью автоматизировать процесс измерения координат небесных тел и их обработки. Причем координаты небесных тел вычисляются практически в режиме реального времени. Для распознавания объектов, перемещающихся относительно неподвижных звезд, каждая область неба экспонируется трижды. Смещение изображения некоторого объекта с одной группы пикселей на другую фиксируется ЭВМ и используется для идентификации движущегося объекта.

Еще одним важным преимуществом применения ПЗС-матриц по сравнению с фотопластинкой является их существенно большая светочувствительность (квантовая эффективность), вследствие чего они могут регистрировать более слабые источники света.

Переход к выполнению позиционных наблюдений малых планет и комет с помощью ПЗС-матриц произвел эффект, подобный замене визуальных наблюдений фотографическими.

Как при использовании фотографического метода, так и при выполнении ПЗС-наблюдений, небесные координаты объектов определяются с некоторыми ошибками, как общими для обоих методов, так и специфическими для данного метода. Специфические ошибки фотографического метода зависят от неточности наведения нитей измерительного прибора на оптический центр изображения объекта и/или опорных звезд, ошибок шкал измерительного прибора. При ПЗС-наблюдениях ошибки зависят от неравномерности разбиения матрицы на отдельные пиксели и от неточности определения «центра тяжести» группы пикселей, на которые падает свет от источника. Общие

для обоих методов ошибки возникают от погрешности координат опорных звезд в каталогах, от неточности решения уравнений, связывающих измеренные прямоугольные координаты на фотопластинке или ПЗС-матрице со сферическими координатами на небесной сфере, и т.д. Опыт показывает, что современные ПЗС-системы обеспечивают более высокую точность получения координат, чем это достигалось ранее.

В настоящее время большая часть всех наблюдений АСЗ и соответственно открытий новых объектов этого типа выполняется на нескольких обсерваториях США, работающих по программе “Space Guard”, поддерживаемой НАСА. Программа предусматривает обнаружение до 2008 г. 90% всех АСЗ с диаметрами, большими или равными одному километру (как известно, столкновение с такими астероидами грозит Земле глобальной катастрофой). Ниже приводится краткое описание программ, выполняемых на отдельных обсерваториях.

LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) осуществляется Лабораторией Линкольна в Сокорро, Нью-Мехико в кооперации с ВВС США на базе 1-метрового телескопа. Первоначально телескоп был оборудован ПЗС-матрицей, содержащей 1024×1024 пикселей. В октябре 1997 г. на телескопе была установлена большая матрица — 1960×2560 пикселей. В октябре 1999 г. был подключен второй 1-метровый телескоп. Высокая квантовая эффективность ПЗС-матриц и относительно большая скорость обработки информации позволили LINEAR просматривать на небесной сфере каждую ночь большие области. В настоящее время LINEAR принадлежит большинство открытий АСЗ (<http://www.ll.mit.edu/LINEAR/>).

NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking). По соглашению Лаборатории реактивного движения (JPL, NASA) с ВВС США для наблюдений АСЗ используется 1-метровый телескоп, расположенный на Халеакала, Мауи, Гавайи (Haleakala, Maui, Hawaii). На телескопе установлена ПЗС-камера с матрицей размером 4096×4096 пикселей, площадь поля составляет $1.2^\circ \times 1.6^\circ$. В феврале 2000 г. программа была перенесена на 1.2-метровый телескоп. С апреля 2001 г. к наблюдениям АСЗ был подключен 1.2-метровый телескоп системы Шмидта обсерватории Маунт Паломар в Калифорнии. В рамках этой программы была разработана специальная система SkyMorph, которая осуществляет поиск наблюдений вновь открываемых АСЗ на ранее отснятых кадрах. Такие наблюдения (если их удастся найти) позволяют улучшить первоначальную орбиту и не потерять объект в будущем (<http://neat.jpl.nasa.gov>).

Spacewatch — программа начата в 1984 г. на 0.9-метровом телескопе Спейсвотч (Spacewatch), установленном в 1962 г. на обсерватории Китт Пик, Аризона (Kitt Peak, Arizona). Его первоначально небольшая ПЗС-камера — 320×512 пикселей, была заменена на большую — 2048×2048 пикселей, и с ней наблюдения проводились в течение 1989–1992 гг. В 1992 г. чувствительность ПЗС-матрицы была увеличена на 70%. Телескоп покрывает примерно

200 квадратных градусов небесной сферы в течение одного месяца, предельная звездная величина составляет 21^m . В 2001 г. начались наблюдения на модернизированном 1.8-метровом телескопе, снабженном системой для более быстрого сканирования небесной сферы (<http://spacewatch.lpl.arizona.edu/>).

LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search). Наблюдения АСЗ по этой программе начались в 1993 г. на 0.6-метровом телескопе Шмидта. Предельная звездная величина составила 19^m . Площадь поля — $2.9^\circ \times 2.9^\circ$. В 1999–2000 гг. эффективность этой программы значительно увеличилась благодаря обновлению ПЗС-матрицы и программного обеспечения (http://www.lowell.edu/users/elgb/loneos_disc.html).

Catalina Sky Survey (CSS) Располагает 0.7-метровым телескопом Шмидта на Маунт Биглоу (Mt. Bigelow — 20 км севернее Тусона, Аризона) и 1.5-метровым телескопом вблизи Маунт Леммон (Mt. Lemmon) (<http://www.lpl.arizona.edu/css/>).

В таблице 5, опубликованной на сайте <http://neo.jpl.nasa.gov/missions/stats.html>, приводится количество всех АСЗ и АСЗ с диаметрами более километра, открытых на этих обсерваториях на 27.03.2003. В последнем столбце таблицы указано общее количество АСЗ, известных в настоящее время. Под названием программы указаны коды отдельных телескопов по каталогу обсерваторий, поддерживаемому Центром малых планет (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/ObsCodes.html>).

В таблице 6 приводится информация о точности позиционных наблюдений малых планет., выполненных на указанных обсерваториях (Vukov et al., 2002). Внутренняя точность одного наблюдения оценена по наблюдениям в течение одной ночи. Внешняя точность одного наблюдения оценена по наблюдениям нескольких близких ночей. Смысл такого разделения состоит в том, что наблюдения в течение одной ночи как правило привязывают к одним и тем же звездам сравнения, поэтому точность всего ряда наблюдений примерно одинаково искажается ошибками отдельных звезд сравнения (оцениваемая величина есть ничто иное как разброс наблюдений относительно подправленной эфемериды). Внешняя точность включает и возможные ошибки звезд сравнения.

В таблице 1 Приложения к данной работе для каждого потенциально опасного астероида приводится число имеющихся для данного астероида оптических (фотографических и ПЗС) наблюдений. Если для данного астероида имеются позиционные радиолокационные наблюдения, то они присоединяются к оптическим наблюдениям посредством знака «+» и их число отмечено латинской буквой г.

При радиолокационных наблюдениях излучаемый передающей антенной радиотелескопа сигнал отражается от поверхности астероида и, спустя некоторое время, улавливается приемной антенной. На практике передающая и приемная антенны чаще всего совмещены в одном устройстве — сферическом

Таблица 5. Число всех АСЗ, открытых в ходе реализации нескольких наблюдательных программ (указывается по полугодиям). В последнем столбце — общее количество АСЗ, известных на конец очередного полугодия. В скобках указываются число АСЗ с диаметрами, большими или равными одному километру.

Половина года	LINEAR (704)	NEAT (566,608, 644)	Spacewatch (691,291)	LONEOS (699)	Catalina (703)	Всего известно на дату
1995 (1)	0 (0)	0 (0)	14 (3)	0 (0)	0 (0)	333 (194)
1995 (2)	0 (0)	0 (0)	12 (4)	0 (0)	0 (0)	347 (199)
1996 (1)	1 (0)	5 (2)	18 (2)	0 (0)	0 (0)	376 (203)
1996 (2)	0 (0)	5 (2)	10 (0)	0 (0)	0 (0)	393 (205)
1997 (1)	3 (0)	2 (1)	10 (4)	0 (0)	0 (0)	412 (211)
1997 (2)	14 (3)	9 (4)	4 (1)	0 (0)	0 (0)	446 (221)
1998 (1)	44 (9)	9 (4)	19 (2)	1 (1)	1 (0)	526 (238)
1998 (2)	91 (28)	2 (2)	17 (1)	6 (3)	2 (0)	650 (275)
1999 (1)	74 (20)	0 (0)	11 (2)	7 (5)	11 (5)	754 (307)
1999 (2)	87 (27)	0 (0)	7 (0)	6 (2)	19 (3)	877 (341)
2000 (1)	107 (33)	2 (2)	14 (1)	21 (2)	13 (5)	1038 (385)
2000 (2)	151 (44)	13 (2)	12 (3)	17 (6)	0 (0)	1239 (444)
2001 (1)	95 (27)	28 (10)	7 (0)	22 (5)	0 (0)	1393 (486)
2001 (2)	182 (32)	64 (11)	15 (0)	21 (6)	0 (0)	1677 (536)
2002 (1)	158 (41)	55 (8)	16 (2)	14 (3)	1 (0)	1927 (593)
2002 (2)	129 (23)	88 (16)	6 (0)	7 (1)	0 (0)	2162 (634)
2003 (1)*	49 (8)	21 (2)	10 (0)	15 (4)	0 (0)	2263 (649)

* — для этой половины года сведения приводятся по состоянию на 27.03.2003

Таблица 6. Точность позиционных наблюдений малых планет, выполненных в 1999, 2000 и 2001 гг. на некоторых обсерваториях

Код	Обсерватория	Точность наблюдений			
		Внутренняя		Внешняя	
		α''	δ''	α''	δ''
566	NEAT, GEODSS	0.25	0.18		
608	Haleakala, NEAT	0.22	0.28	0.57	0.63
644	Mt.Palomar, NEAT	0.19	0.19	0.45	0.50
688	Lowell obs.	0.38	0.26		
689	USNO, Flagstaff			0.19	0.24
691	Spacewatch	0.20	0.21	0.34	0.31
699	Lowell, LONEOS	0.71	0.38	1.00	0.39
703	Catalina Sky Survey	0.44	0.44	0.38	0.40
704	Lincoln Lab., LINEAR	0.49	0.50	0.59	0.60

или параболическом рефлекторе, который может быть ориентирован на тот или иной участок неба. Измеряемыми величинами при радиолокационных наблюдениях являются временная задержка и доплеровский сдвиг частоты. Временная задержка — это время распространения излученного сигнала до поверхности астероида и его возвращения к приемной антенне. Поскольку скорость распространения радиосигнала известна (она равна скорости света), то временная задержка приблизительно определяет удвоенное расстояние до астероида. При так называемых доплеровских наблюдениях измеряется изменение частоты излучаемого сигнала (сдвиг частоты) вследствие его отражения от астероида, движущегося относительно источника излучения (эффект Доплера). Подобные наблюдения позволяют определить скорость изменения расстояния между астероидом и радиотелескопом.

В отличие от оптических наблюдений, дающих положение астероида в плоскости, перпендикулярной к лучу зрения, радиолокационные наблюдения (временная задержка и сдвиг частоты) определяют третью координату (или скорость ее изменения), которая перпендикулярна по направлению к первым двум координатам. Этим определяется большая информативность радиолокационных наблюдений. Кроме того, относительная ошибка радиолокационных наблюдений меньше, чем у обычных оптических наблюдений. Если ошибка в координатах α или δ в $0.1''$ тела, находящегося на расстоянии 0.1 а.е. от Земли, эквивалентна его смещению на десять километров, то ошибка времени запаздывания сигнала в 0.1–1 микросекунду, что обычно при наблюдениях АСЗ, эквивалентна смещению астероида по радиусу-вектору на величину 30–300 метров.

В работе (Yeomans et al., 1987) исследовано влияние использования радиолокационных наблюдений на точность определения орбит АСЗ. В работе показано, что добавление немногочисленных радарных наблюдений обеспечивает умеренное уточнение орбит астероидов, имеющих большую наблюдательную историю. В то же время для недавно открытых астероидов и наблюдавшихся лишь на короткой дуге орбиты радарные наблюдения обеспечивают радикальное уточнение орбиты и тем самым во много раз уменьшают ошибку прогноза движения астероида в будущем.

Кроме того, радарные наблюдения несут богатую информацию о размерах, форме, вращении и структуре поверхности астероидов. К настоящему времени радарные наблюдения выполнены примерно для ста АСЗ (рис. 10). Наибольшее число радарных наблюдений произведено в обсерваториях Аресибо (Пуэрто Рико) и Голдстоун (Калифорния) (Ostro, 1989; Ostro et al., 2002).

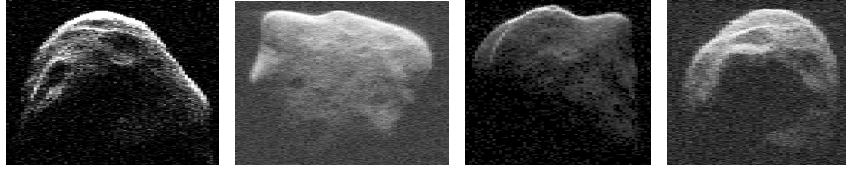


Рис. 10. Радарные изображения астероида 1998 JM₈ (<http://echo.jpl.nasa.gov>)

5. Блеск, абсолютная звездная величина и альbedo астероидов

Астероиды как и все тела Солнечной системы, кроме центрального тела, светят отраженным светом Солнца. При наблюдении глаз регистрирует световой поток, рассеянный астероидом в направлении на Землю и проходящий через зрачок (как характеристику субъективного ощущения света астероидов различной интенсивности рекомендуется использовать термин блеск (Мартынов, 1967)). Фактически глаз реагирует на освещенность сетчатки, т.е. на световой поток, приходящийся на единицу площади площадки, перпендикулярной к лучу зрения, на расстоянии Земли. Освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния астероида от Земли. Учитывая, что рассеянный астероидом поток, обратно пропорционален квадрату его расстояния от Солнца, можно заключить, что освещенность на Земле обратно пропорциональна квадрату расстояний астероида от Солнца и от Земли. Таким образом, если обозначить освещенность, создаваемую астероидом, находящимся на расстоянии r от Солнца и Δ от Земли, посредством E , а посредством E_1 — освещенность от того же тела, но находящегося на единичном расстоянии от Солнца и Земли, то

$$E = E_1 r^{-2} \Delta^{-2}. \quad (5.1)$$

В астрономии освещенность принято выражать в звездных величинах. Интервалом освещенности в одну звездную величину называется отношение освещенностей, создаваемых двумя источниками, при котором освещенность от одного из них в 2.512 раза превосходит освещенность, создаваемую другим. В более общем случае имеет место формула Погсона

$$\frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = 2.512^{(m_2 - m_1)}, \quad (5.2)$$

где E_{m_1} — освещенность от источника со звездной величиной m_1 , E_{m_2} — освещенность от источника со звездной величиной m_2 (освещенность тем меньше, чем больше звездная величина). Из формул (5.1) и (5.2) вытекает зависимость блеска астероида m , выраженного в звездных величинах, на расстоянии r от Солнца и Δ от Земли.

$$m = m_0 + 5\lg(r\Delta), \quad (5.3)$$

где m_0 — так называемая абсолютная звездная величина астероида, численно равная звездной величине, которую бы имел данный астероид, находясь на расстояниях в 1 а.е. от Солнца и от Земли и при нулевом угле фазы (напомним, что углом фазы называется угол при астероиде между направлениями на Солнце и на Землю). Очевидно, что в природе указанная конфигурация трех тел осуществиться не может.

Формула (5.3) не полностью описывает изменение блеска астероида при его орбитальном движении. Фактически блеск астероида зависит не только от его расстояний от Солнца и Земли, но и от угла фазы. Эта зависимость связана, с одной стороны, с наличием ущерб (неосвещенной Солнцем части астероида) при наблюдении с Земли при ненулевом фазовом угле, с другой, от микро и макроструктуры поверхности.

Надо иметь в виду, что астероиды главного пояса могут наблюдаться лишь при относительно небольших фазовых углах, приблизительно до 30° . До 80-ых гг. прошлого века считалось, что добавление в формулу (5.3) слагаемого, пропорционального величине фазового угла, позволяет достаточно хорошо учесть изменение блеска в зависимости от угла фазы

$$m = m_0 + \lg(r\Delta) + k\beta, \quad (5.4)$$

где β — угол фазы. Коэффициент пропорциональности k , хотя и отличается для разных астероидов, варьируется, в основном, в пределах 0.01–0.05 зв.вел./ $^\circ$.

Возрастание звездной величины m с ростом угла фазы согласно формуле (5.4) имеет линейный характер. m_0 есть ордината точки пересечения фазовой кривой (фактически прямой) с вертикалью при $r = \Delta = 1$ и $\beta = 0$.

Более поздние исследования показали, что фазовая кривая астероидов имеет сложный характер. Линейный спад блеска (увеличение звездной величины объекта) с ростом фазового угла имеет место лишь в диапазоне приблизительно от 7° до 40° , после чего начинается нелинейный спад. С другой стороны, при углах фазы, меньших семи градусов, имеет место так называемый оппозиционный эффект — нелинейное нарастание блеска с уменьшением фазового угла (рис. 11).

С 1986 г. в «Эфемеридах малых планет» для вычислений видимой звездной величины астероидов в лучах V (визуальная полоса видимого спектра фотометрической системы UBV) применяется более сложная полуэмпирическая формула, которая позволяет более точно описать изменение блеска в диапазоне фазовых углов от 0° до 120° (Bowell et al., 1989). Формула имеет вид

$$V = H + 5\lg(r\Delta) - 2.5\lg[(1 - G)\Phi_1 + G\Phi_2]. \quad (5.5)$$

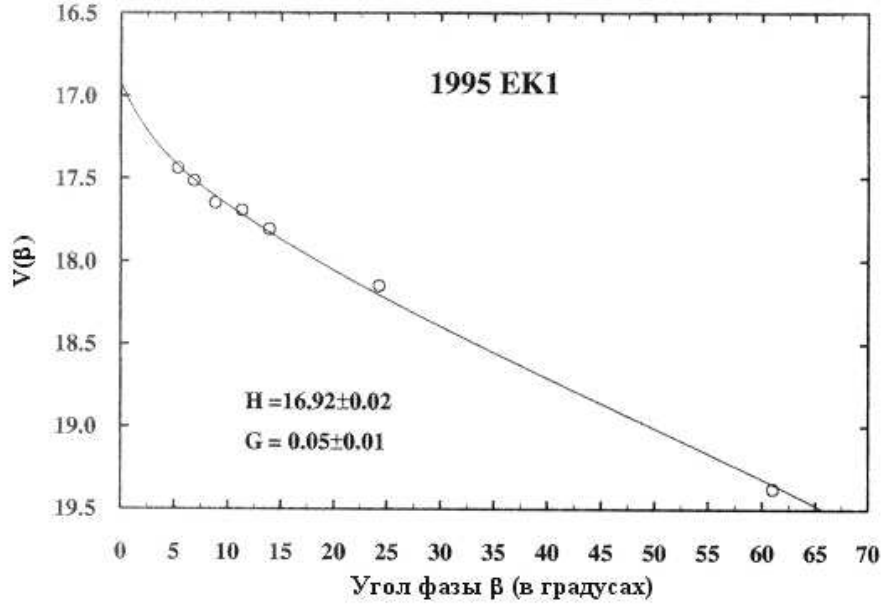


Рис. 11. Зависимость звездной величины от угла фазы для малой планеты 1995 EK₁ (Erikson et al., 2000)

В этой формуле H — абсолютная звездная величина астероида в лучах V , G — так называемый параметр наклона, Φ_1 и Φ_2 — функции угла фазы, определяемые следующими выражениями

$$\Phi_i = \exp \left\{ -A_i \left[\tan (\beta/2)^{B_i} \right] \right\}, \quad i = 1, 2$$

$$A_1 = 3.33, A_2 = 1.87, B_1 = 0.63, B_2 = 1.22.$$

После того как элементы орбиты определены и, следовательно, r , Δ и β могут быть вычислены, формула (5.5) позволяет найти абсолютную звездную величину, если имеются наблюдения видимой звездной величины. Для определения параметра G требуются наблюдения видимой звездной величины при различных углах фазы. В настоящее время значение параметра G определено из наблюдений только для 114 астероидов, в том числе для нескольких АСЗ. Найденные значения G варьируются в пределах от -0.12 до $+0.60$. Для прочих астероидов значение G принимается равным $+0.15$.

В таблице 1 Приложения приводятся значения абсолютной звездной величины H и параметра наклона G для всех потенциально опасных астероидов.

Поток лучистой энергии Солнца в диапазоне длин волн видимого света, падающий на поверхность астероида, обратно пропорционален квадрату его расстояния от Солнца и, очевидно, зависит от размеров астероида. Этот поток частично поглощается поверхностью астероида, нагревая ее, а частично

рассеивается по всем направлениям. Отношение величины рассеянного по всем направлениям потока к упавшему потоку называется сферическим альбедо A . Оно характеризует отражательную способность поверхности астероида.

Сферическое альбедо принято представлять в виде произведения двух сомножителей

$$A = pq.$$

Первый сомножитель, называемый геометрическим альбедо, есть отношение блеска реальной планеты при нулевом угле фазы к блеску абсолютно белого диска того же радиуса, что и планета, и расположенного перпендикулярно к солнечным лучам на том же расстоянии от Солнца и Земли, что и планета. Вторым сомножителем, называемым фазовым интегралом, зависит от формы поверхности.

В противоречии со своим названием геометрическое альбедо определяет как раз зависимость рассеяния падающего потока не от геометрии тела, а от физических свойств поверхности. Значения именно геометрического альбедо приводят в таблицах и имеют в виду, когда говорят об отражательной способности поверхностей астероидов.

Альбедо не зависит от размеров тела. Оно тесным образом связано с минералогическим составом и микроструктурой поверхностных слоев астероида и может быть использовано для классификации астероидов и определения их размеров. Для разных астероидов альбедо варьируется в пределах от 0.02 (очень темные объекты, отражающие только 2% падающего света Солнца) до 0.5 и более (очень светлые).

Для дальнейшего важно установить связь между радиусом планеты, ее альбедо и абсолютной звездной величиной. Очевидно, что чем больше радиус планеты и чем больше ее альбедо, тем больший световой поток отбрасывает она в заданном направлении при прочих равных условиях. Освещенность, которую планета создает на Земле, зависит также от ее расстояния от Солнца и Земли и потока лучистой энергии Солнца, который может быть выражен через звездную величину Солнца.

Если обозначить освещенность, создаваемую Солнцем на Земле, как E_{\odot} , а освещенность, создаваемую планетой, как E , расстояния планеты от Солнца и Земли обозначить как r и Δ , а радиус планеты (в а.е.) как ρ , то имеет место формула

$$p = \frac{E}{E_{\odot}} \cdot \frac{r^2 \Delta^2}{\rho^2}.$$

Если прологарифмировать это соотношение и заменить логарифм отношения E/E_{\odot} по формуле Погсона (5.2), то найдем

$$\lg p = 0.4(m_{\odot} - m) + 2(\lg r + \lg \Delta - \lg \rho),$$

где m_{\odot} — звездная величина Солнца. Заменим теперь m по формуле (5.3), тогда

$$\lg p = 0.4(m_{\odot} - m_0) - 2\lg \rho,$$

или, выражая диаметр в километрах и полагая звездную величину Солнца в лучах V равной -26.77 (Герелс, 1974), получим

$$\lg D = 3.122 - 0.5\lg p - 0.2H, \quad (5.6)$$

где H — абсолютная звездная величина малой планеты в лучах V .

6. Диаметры

Абсолютная звездная величина H — важная характеристика астероида, которая позволяет оценить его линейные размеры, если найдено или из каких-либо соображений принято значение альбедо. Формула, которая связывает диаметр астероида, выраженный в километрах, его абсолютную звездную величину и так называемое геометрическое альбедо p была получена в предыдущем параграфе

$$\lg D = 3.122 - 0.5\lg p - 0.2H. \quad (6.1)$$

Данная формула позволяет достаточно надежно оценивать диаметры астероидов, имеющих значительные по величине альбедо (более 0.05). При меньших альбедо относительная ошибка может быть весьма большой.

Поскольку альбедо зависит от длины волны света, то в формуле (6.1) предполагается использование альбедо в тех же лучах V , в которых оценивалась звездная величина Солнца и величина H (обозначается как p_V).

Для оценки фотометрического значения диаметра астероида по его абсолютной звездной величине можно воспользоваться таблицей 7, опубликованной на сайте Центра малых планет. Таблица дает величины диаметров для значений альбедо 0.25 и 0.05. Для значений H из левой колонки диаметры приводятся в километрах, для значений H из правой колонки — в метрах (как показывает формула (6.1), значения H , различающиеся на 15 звездных величин, при одном и том же значении альбедо дают значения диаметров, отличающиеся ровно в тысячу раз).

Если принять для астероидов, как это часто делается, среднее значение альбедо равным 0.13, то минимальные и максимальные значения альбедо для отдельных астероидов могут отличаться от него примерно в пять раз. Формула (6.1) показывает, что предельные значения диаметров при этом могут

Таблица 7. Диаметры астероидов в зависимости от звездной величины и принятого значения альbedo

H (m)	Диаметр при $p_V = 0.25$	Диаметр при $p_V = 0.05$	H (m)
→	в км в метрах	в км в метрах	←
3.0	670	1500	18.0
3.5	530	1200	18.5
4.0	420	940	19.0
4.5	330	740	19.5
5.0	260	590	20.0
5.5	210	470	20.5
6.0	170	370	21.0
6.5	130	300	21.5
7.0	110	240	22.0
7.5	85	190	22.5
8.0	65	150	23.0
8.5	50	120	23.5
9.0	40	95	24.0
9.5	35	75	24.5
10.0	25	60	25.0
10.5	20	50	25.5
11.0	17	37	26.0
11.5	13	30	26.5
12.0	11	24	27.0
12.5	8	19	27.5
13.0	7	15	28.0
13.5	5	12	28.5
14.0	4	9	29.0
14.5	3	7	29.5
15.0	3	6	30.0
15.5	2	5	
16.0	2	4	
16.5	1	3	
17.0	1	2	
17.5	1	2	

Примечание. Для H , взятого из левой колонки, таблица дает значение диаметра в километрах; для H из правой колонки — в метрах.

Таблица 8. Измеренные диаметры крупных астероидов и полученные значения альbedo

Астероид	D (км)	p
Ceres	770 ± 40	$0.09 \div 0.11$
Pallas	490 ± 50	$0.10 \div 0.16$
Juno	200 ± 50	$0.11 \div 0.31$
Vesta	420 ± 35	$0.33 \div 0.46$

отличаться от номинального значения, соответствующего среднему значению альbedo, примерно в 2.25 раза.

Формулы типа (6.1) позволяют найти фотометрические, или, иначе говоря, принятые значения диаметров, если известно альbedo, либо определить альbedo, если известен диаметр. Но величина альbedo астероидов почти столь же трудно определяемая величина как и диаметр.

В конце XIX века измерения угловых значений диаметров четырех первых астероидов были проведены Барнардом с помощью нитяного микрометра на 90- и 100-см рефракторах Ликской и Иеркской обсерваторий. Эти измерения позволили впервые определить свободную от предположений величину диаметров и соответствующие им значения альbedo четырех астероидов (таблица 8) (Дольфюс, 1974).

Однако метод непосредственного измерения диаметров не может быть распространен на другие астероиды в силу малости их диаметров и больших относительных ошибок измерений. В течение длительного времени результаты Барнарда оставались едва ли не единственным источником представлений об альbedo астероидов. Лишь в семидесятые годы прошлого века появились новые, перспективные методы определения их диаметров и альbedo: поляриметрический и радиометрический методы.

Поляриметрический метод основан на тесной корреляции, которая, как показал Вайдорн (Widorn, 1967), существует между степенью поляризации света, отражаемого некоторой поверхностью при разных углах фазы, и ее альbedo. Существование корреляции было установлено на основе изучения поляризационных кривых для многочисленных лабораторных образцов. Типичные поляризационные кривые имеет вид, представленный на рисунке 12.

На этом рисунке вдоль горизонтальной оси отложены углы фазы, а по вертикальной оси степень поляризации отраженного света, выраженная в процентах. Степень поляризации P , которая при нулевой фазе равна нулю, сначала уменьшается с ростом фазового угла, затем достигает минимального значения и в дальнейшем растет до положительных значений. Как оказалось, ряд характеристик поляризационной кривой, в особенности угол h наклона кривой к горизонтали при смене знака P , весьма чувствителен к величине

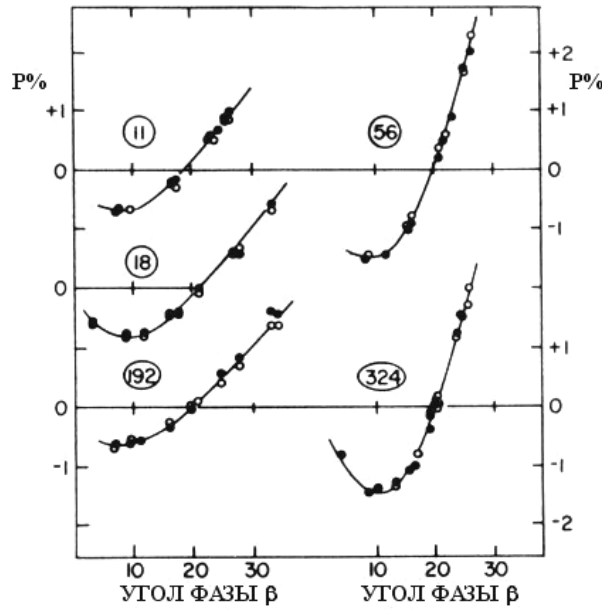


Рис. 12. Поляризационные кривые для ряда астероидов (Dollfus and Zellner, 1979); угол фазы выражен в градусах.

альбедо и слабо зависит от других характеристик поверхности. Исследование лабораторных образцов позволили калибровать зависимость альбедо от величины угла h . В дальнейшем получение кривых поляризации для нескольких десятков малых планет позволили найти их альбедо и диаметры.

Радиометрический метод определения диаметров и альбедо малых планет основан на сравнении блеска астероидов в видимой области спектра и их теплового излучения в инфракрасной области. Как показывает формула (6.1), для каждого значения абсолютной звездной величины можно найти множество пар значений альбедо и соответствующих значений диаметров, удовлетворяющих этой формуле. Астероид с заданной абсолютной звездной величиной может иметь большое альбедо и малые размеры. Но такой же блеск может быть обеспечен телом с небольшим альбедо, но больших размеров. Разница между ними заключается в том, что тело с большим альбедо отражает большую часть света по сравнению со вторым и, следовательно, его температура будет ниже. Его излучение в инфракрасной области спектра будет меньше. Если выполнено измерение потока тепла от астероида, то есть возможность найти такие значения альбедо и диаметра, которые, с одной стороны, удовлетворяют формуле (6.1), с другой, обеспечивают наблюдаемый поток. Метод одновременного определения диаметров и альбедо астероидов, основанный на подобных соображениях, был развит в работах Д.Аллена (Allen, 1971) и Д.Матсона (Matson, 1971). В дальнейшем он был

усовершенствован и широко применялся на практике. Диаметры и альbedo свыше двухсот астероидов были определены этим методом.

Диаметры нескольких десятков астероидов были оценены с высокой точностью на основе наблюдений покрытий звезд этими астероидами (Millis and Dunham, 1989).

В январе 1983 г. на орбиту вокруг Земли был выведен спутник IRAS (Infrared Astronomical Satellite). Основной целью запуска являлся обзор неба в четырех полосах инфракрасной области спектра в окрестности длин волн 12, 25, 60 и 100 микрон. Результаты наблюдений IRAS, касающиеся астероидов, явились наиболее полным набором данных о диаметрах и альbedo этих тел (Matson et al., 1989; Veeder and Tedesco, 1992), хотя они не свободны от систематических ошибок (Лупишко, 1998). Более поздняя версия обработки данных IRAS содержится в работе (Tedesco et al., 2002).

Данные IRAS охватывают диаметры и альbedo для двух тысяч астероидов, причем каждое значение сопровождается оценкой точности найденной величины. Точность определения диаметров колеблется на уровне от одного до десяти процентов.

Данные IRAS, прежде всего, подтвердили известный ранее результат, что распределение альbedo астероидов имеет бимодальный характер (рис. 13).

Как видно на рисунке, имеется два максимума распределения альbedo: один в окрестности альbedo, равного 0.05, другой в окрестности значения 0.2. В области больших диаметров (больших 40 км) почти отсутствуют астероиды с альbedo около 0.1, но в области малых диаметров бимодальность не наблюдается. В области больших диаметров число астероидов с альbedo, меньшим чем 0.1, почти в три раза превышает число астероидов с альbedo, большим чем 0.1. О распределении альbedo у АСЗ будет сказано в дальнейшем.

Бимодальность распределения альbedo указывает на то, что в поясе астероидов имеется по крайней мере две группы астероидов с резко отличными оптическими свойствами поверхностных слоев. Астероиды с альbedo меньше 0.03 отражают столь мало света, что единственной подходящей субстанцией, обеспечивающей столь сильное поглощение, оказывается углерод. Эти соображения дают основание для выделения обширного класса астероидов, получивших название углистых, или *C*-астероидов. Другой обширный класс астероидов с высокими альbedo получил наименование каменных, или *S*-астероидов.

7. Массы и плотности

Масса и плотность астероида являются его важными характеристиками. Поскольку энергия, выделяющаяся при столкновении тела с Землей, пропорциональна массе тела, получение оценки массы является необходимым

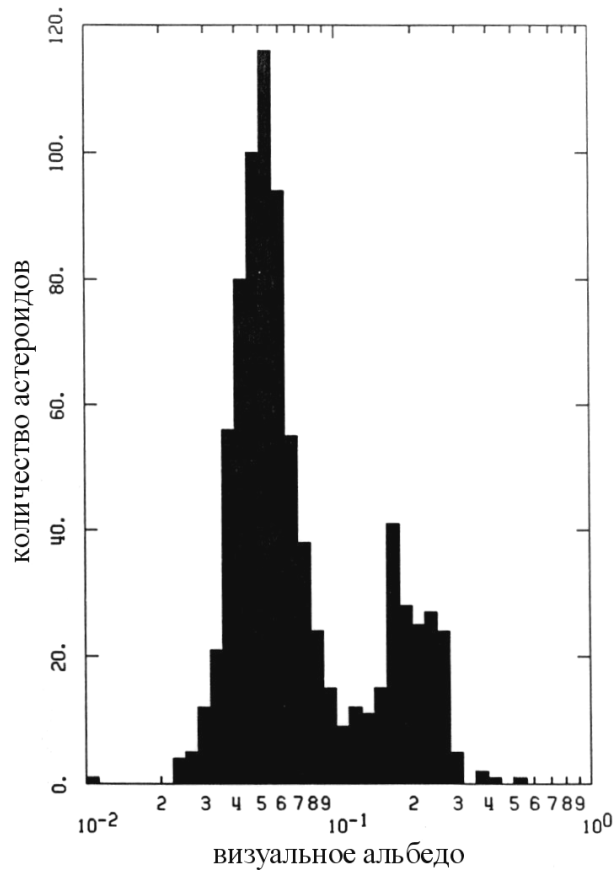


Рис. 13. Распределение альbedo астероидов крупнее 40 км (Veeder and Tedesco, 1992)

элементом оценивания величины опасности, представляемой тем или иным телом, находящимся на траектории столкновения с Землей.

Масса, объем и плотность астероида связаны простым соотношением:

$$m = V\rho,$$

где m — масса, V — объем и ρ — средняя плотность вещества астероида. При этом обычно предполагается, что астероид имеет сферическую форму, откуда вытекает формула

$$m = \frac{\pi}{6}D^3\rho, \tag{7.1}$$

где D — диаметр астероида.

На практике три величины m , D и ρ могут определяться как независимо друг от друга, так и с привлечением данных о двух других параметрах.

Сравнение по-разному найденных значений позволяет контролировать различные методы и полученные оценки и определить для каждого астероида согласованный набор этих значений.

Способы получения оценки массы астероидов можно условно разделить на динамический и астрофизический (или физический).

Динамический метод основан на анализе отклонений, вызываемых притягивающей массой тела в движении других небесных тел (больших или малых планет, космических аппаратов). Эти отклонения могут быть найдены или из позиционных оптических или радиолокационных наблюдений возмущаемых тел или из радиотехнических измерений движения космических аппаратов, проходящих в непосредственной близости от возмущающей массы. Чтобы это было возможно, наблюдения должны быть достаточно точными, а оцениваемая масса должна вызывать отклонения в движении тел, заметным образом превосходящие точность наблюдений. Как показывает опыт последних десятилетий, массы только самых крупных астероидов (в лучшем случае нескольких десятков) могут быть найдены из анализа современных позиционных наблюдений. Массы наименьших из этих астероидов оцениваются с ошибками, лишь немногим меньшими самих оцениваемых величин.

Сближения космических аппаратов с астероидами представляют прекрасную возможность для определения их масс, но они пока редки и не могут обеспечить точные значения масс для большого числа тел. Этим путем были получены оценки масс астероидов главного пояса (253) Mathilde, (433) Eros.

К динамическому способу определения массы следует отнести также использование с этой целью третьего закона Кеплера, который в применении к спутниковой системе записывается в виде

$$a^3 n^2 = k^2 (m_0 + m)$$

где a — большая полуось орбиты спутника относительно главного компонента, выраженная в а.е., n — среднее движение спутника в радианах в сутки, m_0 — масса главного компонента, выраженная в долях массы Солнца, m — масса спутника, также выраженная в долях массы Солнца, k — постоянная Гаусса (см. §2).

Формула может быть применена для определения массы двойного астероида, если известна большая полуось орбиты спутника и период его обращения вокруг главного компонента. Таким путем была оценена, например, масса (243) Ida.

Большая полуось и период обращения спутника могут быть получены из анализа световых кривых двойных астероидов (см. §8). Например, для АСЗ 1996 FG₃ были найдены значения суммарной массы, диаметров компонентов и в результате — значение общей средней плотности компонентов, которая оказалась равной 1.005 ± 0.008 г/см³ (Железнов, 2002). Тело с такой средней плотностью может быть фрагментом кометного ядра или же представлять

собой “rubble pile” — рыхлое тело, сложенное из отдельных фрагментов с многочисленными пустотами между ними, возникшее в результате фрагментации и последующей аккреции.

Физический способ получения оценки массы состоит в вычислении массы по формуле (7.1), основываясь на знании средней плотности и диаметра. Самые первые оценки масс астероидов были сделаны в предположении, что их плотность близка к средней плотности Земли или же к средней плотности метеоритного вещества, а в качестве диаметров использовались результаты микрометрических измерений. В дальнейшем появилась возможность использовать более точные значения диаметров, определенные поляриметрическим или радиометрическим методами, а при определении средней плотности астероида использовать его таксономический класс и плотности предполагаемых метеоритных аналогов. В последние годы были опубликованы работы, в которых оценка средних плотностей астероидов различных таксономических классов была выполнена на основе анализа суммарного гравитационного влияния нескольких сотен наиболее массивных астероидов на движение Марса, или, точнее говоря, на движение посадочных аппаратов Viking-1, 2 и Pathfinder. Движение этих аппаратов вместе с центром инерции планеты и вращение вокруг ее оси прослеживается с большой точностью с помощью радиотехнических средств измерений (ошибка положения не превышает нескольких метров). Для оценки возмущающего влияния на движение посадочных аппаратов исследованная совокупность астероидов была разбита на три группы (три суперкласса) в соответствии с предполагаемой близостью их минералогического состава (таблица 9). Поправки к исходным значениям средних плотностей астероидов, отнесенных к трем суперклассам, определялись по методу наименьших квадратов, исходя из условия минимизации остаточных уклонений в движении посадочных аппаратов, т.е. из условия наилучшего представления наблюдений. Средние значения плотностей, найденные для этих суперклассов, могут быть использованы для оценивания масс конкретных астероидов, если известна их таксономическая классификация. Вопрос о том, как оценить массу астероида, если ничего, кроме его абсолютной звездной величины, не известно, рассмотрен в §13.

8. Вращение астероидов

Помимо вариации блеска, связанной с изменением расстояний от Солнца, Земли и угла фазы (см. §5), все астероиды обнаруживают колебания блеска большей или меньшей амплитуды, в большинстве случаев с периодами от нескольких часов до одних суток. Соответствующий график изменения блеска называется световой кривой, или кривой блеска (рис. 14).

Кривая представлена значениями блеска, полученными с 24 февраля по 9 марта 1995 г. По горизонтальной оси отложены доли периода, отсчитанные

Таблица 9. Результаты определения средних плотностей вещества суперклассов ($\text{г}/\text{см}^3$)

Суперклассы	C	S	M
Таксономические классы по Толену	C,D,P,T,B,G,F	S,K,Q,V,R,A,E	M
Плотность (Standish, 2000)	1.29 ± 0.06	2.71 ± 0.04	5.29 ± 0.53
Плотность (Krasinsky et al., 2001)	1.38 ± 0.02	2.71 ± 0.02	5.32 ± 0.07

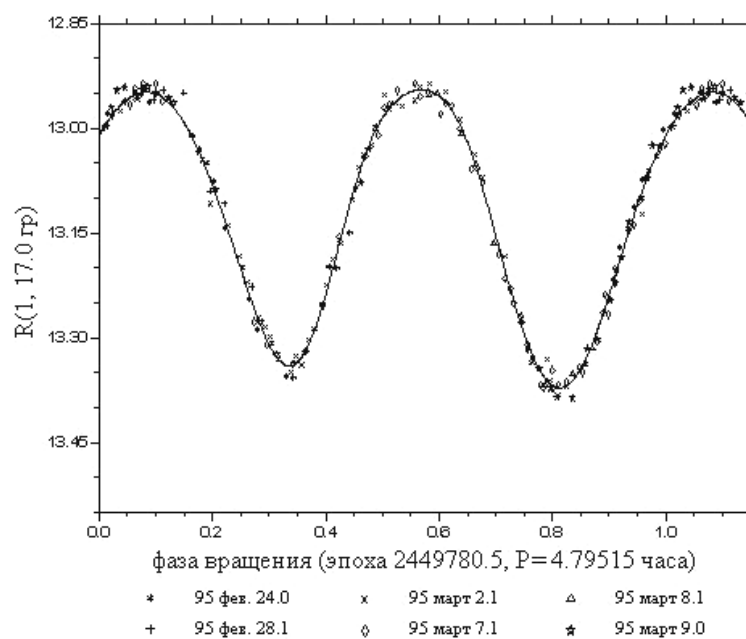


Рис. 14. Световая кривая астероида (1627) Ivar (<http://sunkl.asu.cas.cz/~ppravec/ivar.htm>)

от условного начала. По вертикальной оси отложены звездные величины в лучах R , редуцированные к единичным расстояниям от Земли и Солнца и углу фазы 17° .

Обычно невозможно пронаблюдать весь цикл изменения блеска астероида в течение одной ночи, да в этом и нет необходимости. На график наносятся точки, полученные в разные ночи, и по ним строится световая кривая. Если при этом периоды наблюдений разделены достаточно продолжительными интервалами времени, то при построении световой кривой учитывается изменение блеска, связанное с изменением взаимного расположения Солнца, Земли

и астероида за время между сериями наблюдений (Harris and Lupishko, 1989). Световая кривая, полученная таким образом, называется композиционной.

Характерной особенностью световых кривых астероидов является наличие на этих кривых двух максимумов и двух минимумов за период, причем очень часто оба максимума и оба минимума различаются по величине. Световые кривые некоторых астероидов имеют аномальное число экстремумов. Амплитуда колебания для разных астероидов меняется в пределах от нескольких сотых долей звездной величины ((1) Ceres) до двух звездных величин ((1628) Geographos, (1865) Cerberus). Причиной короткопериодических колебаний блеска является вращение астероида вокруг оси, проходящей через центр инерции тела. При этом изменяется видимая с Земли часть поверхности астероида и, возможно, альbedo видимой части. Последнее, правда, не играет заметной роли, как о том свидетельствует постоянство цветовых характеристик при вращении астероидов.

То, что вращение громадного большинства астероидов совершается вокруг единственной оси, сохраняющей свое направление в пространстве, подтверждается наблюдениями: световые кривые, как правило, являются строго периодическими с единственным и притом неизменным периодом. Такие кривые соответствуют вращению астероидов вокруг оси наибольшего момента инерции тела. Если представить фигуру астероида в виде трехосного эллипсоида, то вращение происходит вокруг его самой короткой главной оси. При отсутствии сил, не проходящих через центр инерции астероида, такой характер вращения может продолжаться произвольно долго. Если в результате нецентрального столкновения с другим телом ось вращения астероида будет выведена из этого состояния, движение астероида относительно его центра инерции приобретет характер кувыркания: ось вращения не будет с течением времени сохранять свое положение в теле астероида, и в зависимости от его формы (эллипсоида инерции) и величины полученного импульса будет перемещаться более или менее сложным образом. Наблюдатель отметит, что кривая блеска также меняется сложным образом в соответствии с изменениями ориентации оси вращения. Такое вращение астероида сопряжено с постоянным изменением центробежных сил и сил сцепления между частицами вещества, что приводит для неупругого тела к потере энергии вращения и постепенному возвращению к состоянию вращения вокруг оси наибольшего момента инерции. В работе (Burns and Safronov, 1973) было показано, что процесс затухания сложного вращения астероидов протекает весьма быстро и практически все астероиды должны наблюдаться в состоянии вращения вокруг оси наибольшего момента инерции. Впоследствии А. Харрис пересмотрел этот вывод (Harris, 1994). Согласно последней работе, для ряда небольших по величине и медленно вращающихся астероидов время затухания сложного вращения может превышать 10^8 лет, а для некоторых даже превосходить время существования Солнечной системы.

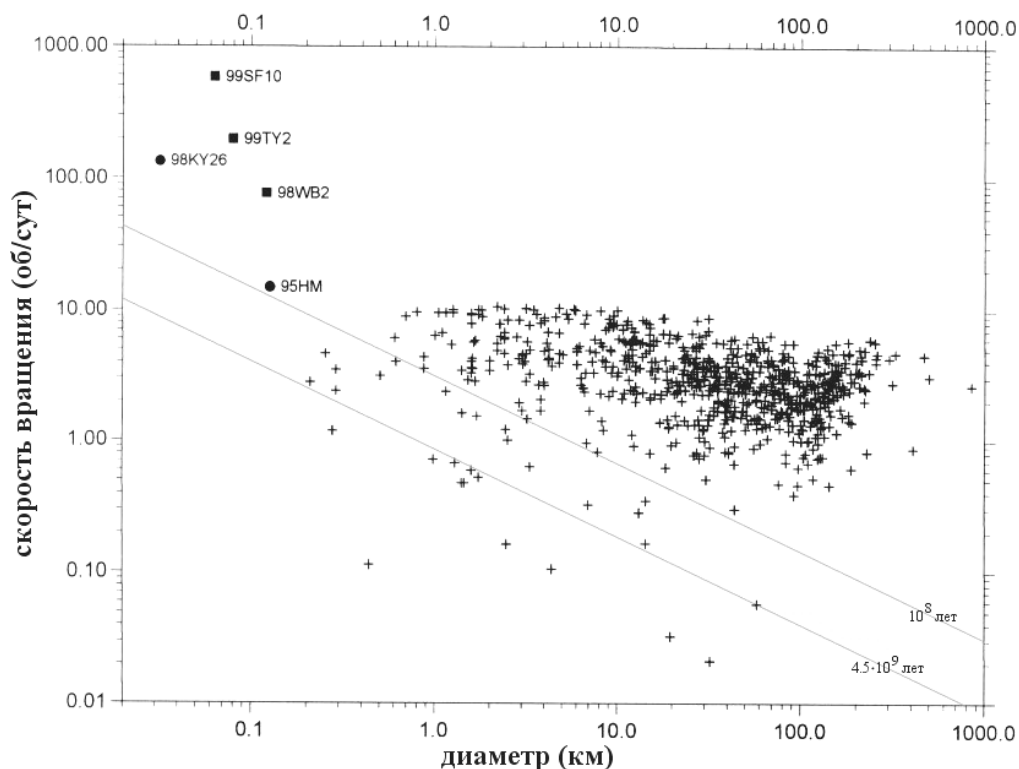


Рис. 15. Скорости вращений астероидов

На рис. 15 (Pravec et al., 2000), представлены данные о вращении 750 астероидов. Верхняя из двух нанесенных нами на этот рисунок пунктирных прямых отделяет от основного массива те астероиды, для которых, согласно работе (Harris, 1994), время затухания сложного вращения превышает 10^8 лет, а в промежутке между двумя пунктирными прямыми располагаются астероиды, для которых это время лежит в интервале $10^8 \div 4.5 \times 10^9$ лет. Среди астероидов с очень большим временем затухания находятся астероиды (288) Glauke, (887) Alinda, (1220) Crocus, (1689) Floris-Jan, (3102) Krok, (3287) Seleucus, (3691) Bede, (4179) Toutatis, (4486) Mithra, (13651) 1997 BR. Эти астероиды демонстрируют либо сложный характер кривых блеска, либо наблюдательные данные недостаточны, чтобы исключить для них возможность вращения не вокруг оси наибольшего момента инерции. Наличие долгого и короткого периодов колебаний у (1220) Crocus связано, по-видимому, с вынужденной прецессией оси вращения главного компонента под влиянием притяжения спутника (Binzel, 1987). Особенно интересен случай (4179) Toutatis.

Этот потенциально опасный астероид был открыт в 1989 г. Он интенсив-

но наблюдался с помощью оптических средств и радиолокаторов в периоды его сближений с Землей в 1992, 1996 и 2000 гг. С помощью радиолокационных наблюдений удалось определить весьма причудливую форму астероида и сложный характер его вращения (рис. 16) (Hudson and Ostro, 1995).

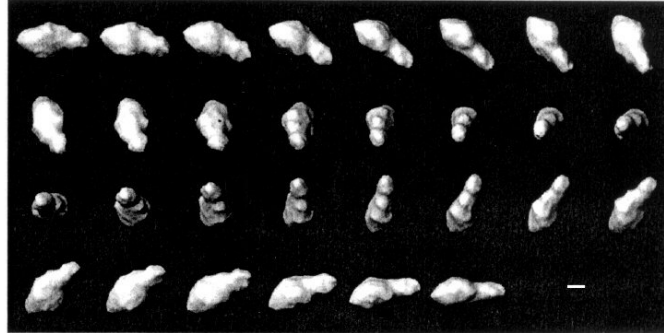


Рис. 16. Последовательные фазы вращения астероида (4179) Toutatis

Размеры астероида составляют $4.60 \times 2.40 \times 1.92$ км. Его ось вращения постоянно меняет свое направление как в теле астероида, так и относительно неподвижной системы координат. Кувыркания астероида могут быть приближенно описаны как вращение его тела вокруг длинной оси с периодом 5.367 ± 0.01 суток и равномерной прецессией этой оси вокруг постоянного направления в пространстве — направления вектора момента количества движения астероида относительно его центра инерции — с периодом 7.420 ± 0.05 суток (Ostro et al., 1999).

Наблюдения за различными астероидами в разных оппозициях показывает, что у одних астероидов амплитуда колебаний блеска за ротационный цикл остается неизменной или слабо меняется от оппозиции к оппозиции, в то время как у других — эти изменения весьма заметны. Например, амплитуда колебаний блеска (16) Psyche в разных оппозициях меняется от $0^m 03$ до $0^m 42$. Причина этих различий заключается в том, что ось вращения, сохраняющая неизменное направление в пространстве, в разных оппозициях образует с лучом зрения различный угол (так называемый угол аспекта). Если угол аспекта составляет 90° (в момент наблюдения ось вращения лежит в картинной плоскости), колебания блеска, связанные с вращением, оказываются максимальными. Напротив того, если ось вращения параллельна лучу зрения (угол аспекта близок к нулю), наблюдаемая площадь поверхности остается неизменной и колебания блеска отсутствуют (при больших фазовых углах колебания могут наблюдаться в результате попадания в тень разных участков поверхности). На этих соображениях основываются методы определения направления оси вращения в пространстве. Для этого требуется сопоставить кривые блеска, полученные в разных оппозициях при раз-

личных углах аспекта. Даже без особых вычислений можно видеть, что ось вращения (16) Psyche слабо наклонена к плоскости эклиптики: учитывая геометрию ее орбиты, только при этом условии данную малую планету можно наблюдать при малых углах аспекта, когда колебания блеска оказываются минимальными. Тем не менее, методы определения оси вращения (координат полюса) являются весьма трудоемкими и сопряжены с большими ошибками. Поэтому направления осей вращения известны только для небольшого числа астероидов. (См. <http://pdssbn.astro.umd.edu/SBNast/holdings/EAR-A-5-DDR-ASTEROID-SPIN-VECTORS-V4.0.html>).

Амплитуда колебания блеска за один ротационный цикл дает некоторое представление о форме астероида. Так, если тело астероида аппроксимировать трехосным эллипсоидом с полуосями $a > b > c$ и если вращение происходит вокруг оси c , что, как мы видели, является общим случаем, то величина амплитуды колебания блеска выражается формулой (Binzel et al., 1989)

$$A(\theta) = 2.5 \log \left(\frac{a}{b} \right) - 1.25 \log \left(\frac{a^2 \cos^2 \theta + c^2 \sin^2 \theta}{b^2 \cos^2 \theta + c^2 \sin^2 \theta} \right), \quad (8.1)$$

где θ — угол аспекта.

При $\theta = 90^\circ$, $A = 2.5 \log(a/b)$. Если $\theta = 0^\circ$, колебание блеска отсутствуют. Задав определенное значение амплитуды и угла θ , можно по формуле вычислить отношение полуосей фигуры астероида. Если световая кривая получена по наблюдениям в одной оппозиции, то угол аспекта не известен. Чтобы получать статистически правильные выводы, следует применять формулу при каком-то определенном значении угла аспекта. Если допустить, что оси вращения астероидов не имеют какого-либо преимущественного направления (направлений) в пространстве (изотропное распределение), то ожидаемое среднее значение угла аспекта, как не трудно видеть, равно 60° . Его и следует использовать в формуле (8.1). В тех случаях, когда имеются кривые блеска в разных оппозициях, может быть предложена другая, более сложная процедура, учитывающая всю имеющуюся информацию (Binzel and Sauter, 1992).

Формула (8.1) требует осторожности при ее использовании в тех случаях, когда световая кривая получена при значительных углах фазы, как о том свидетельствует пример малой планеты (1620) Geographos. Максимальная амплитуда колебаний его блеска 2.03 (таблица 1 Приложения) была найдена при угле фазы равном 53° . По формуле (8.1) находим, положив угол аспекта равным 90° , что $a/b = 6.5$. Более аккуратная обработка всех имеющихся кривых блеска позволила оценить отношение осей астероида величиной $2.5 \div 2.6$ (см, например, (Kwiatkowski, 1995; Magnusson et al., 1996)). Эти результаты хорошо согласуются с радиолокационными наблюдениями астероида (Ostro et al., 1995a). Наибольший размер астероида, силуэт которого представлен на рис. 17, оценивается величиной 5.11 ± 0.15 км, а в поперечном направлении —

1.85 ± 0.15 км (отношение размеров равно 2.76 ± 0.21). Трехосная эллипсоидальная модель астероида по наземным фотометрическим наблюдениям дает $a/b = 2.58 \pm 0.16$, $b/c = 1.00 \pm 0.15$ (Magnusson et al., 1996).



Рис. 17. Радарное изображение астероида (1620) Geographos

Форма астероида уникальна по своей вытянутости и, по-видимому, свидетельствует о его образовании в результате разрушения более крупного тела.

В таблице 1 Приложения приводится период вращения астероида P , выраженный в часах, если он известен, полная амплитуда (вариация) колебания блеска в пределах одного периода Var или наблюдавшиеся пределы изменения этой амплитуды в разных оппозициях.

Возвратимся снова к рассмотрению рисунка 15, который обнаруживает ряд интересных особенностей вращения астероидов. В нижней части рисунка располагаются медленно вращающиеся астероиды, к числу которых можно отнести тела с периодами вращения, большими 30 часов. Особенно велик процент таких астероидов среди тел с диаметрами меньшими 10 км. В рассматриваемой выборке 750 астероидов это преимущественно АСЗ. Мы уже видели, что многие из этих медленно вращающихся астероидов имеют кривые блеска, наталкивающие на мысль об их вращении не вокруг оси наибольшего момента инерции.

Наибольшие периоды вращения в среднем имеют астероиды около 100 км в диаметре. С уменьшением диаметров до 10 км наблюдается увеличение средней частоты вращения. На интервале от 10 км до 1 км нарастание средней частоты вращения становится более пологим.

Обращает на себя внимание существование отчетливо выраженной границы угловой скорости вращения астероидов, равной примерно 11 оборотам в сутки, или один оборот за 2.2 часа. К этой границе вплотную расположен ряд астероидов с диаметрами в интервале от одного до десяти километров. Для астероидов от 40 км и более граница отодвигается в сторону меньших угловых скоростей. На рисунке имеется только пять точек, расположенных выше указанной границы. Все они соответствуют астероидам с диаметрами меньшими 200 м. Нет никакого сомнения в том, что существование верхней границы угловой скорости астероидов с диаметрами, большими 200 м, связано с достижением при достаточно большой скорости предела устойчивости —

равенства силы тяжести и центробежной силы инерции на экваторе вращающегося тела. Действительно, из условия равенства сил, действующих на частицу вещества, находим

$$G \frac{m}{r^2} = \omega^2 R,$$

где G — гравитационная постоянная, m — масса сферического тела радиуса R , а ω — его угловая скорость.

Из этого условия вытекает формула для периода оборота тела, выраженного в часах, при котором достигается равенство сил

$$P_c = \frac{3.3^h}{\sqrt{\rho}},$$

где ρ — средняя плотность тела, выраженная в г/см³.

Подставляя в последнюю формулу значение плотности, равное 2.25 г/см³, находим $P_c=2.2$ часа. При большей скорости вращения частицы, находящиеся на экваторе, будут отделяться от тела, если их не удерживает сила сцепления с другими частицами.

Критическое значение скорости может быть уточнено, если учесть форму тела. В случае эллипсоидальной формы тела, вращающегося вокруг самой короткой оси, критический по величине период оборота оказывается приближенно равным (Pravec and Harris, 2000)

$$P_c = \frac{3.3^h}{\sqrt{\rho}} \sqrt{(1 + \Delta V)}, \quad (8.2)$$

где ΔV — полная амплитуда колебания блеска за период оборота астероида.

На рисунке 18 (Pravec and Harris, 2000) представлено распределение скоростей вращения АСЗ в зависимости от полной вариации блеска за период. Штриховые линии представляют критические значения частоты вращения при различных значениях плотности, отмеченных на рисунке. Как видно из рисунка, все астероиды с диаметрами больше 200 м имеют скорости вращения, качественно согласующиеся с формулой (8.2). Концентрация точек к линиям, соответствующим критическим скоростям вращения при различных плотностях, является свидетельством того, что тела, большие по размеру чем несколько сот метров, являются гравитационно связанными агрегатами, состоящими из отдельных фрагментов (“rubble piles”).

Справа от линий критических частот на рисунке располагаются только два астероида. С учетом данных (Pravec et al., 2000) их должно быть пять. Размеры всех пяти астероидов лежат в пределах от 30 до 130 м, а периоды обращения — в пределах от 2.5 мин до 97.2 мин. Такие скорости вращения означают, что эти тела представляют собой монолитные образования, которые сохраняют целостность при быстром вращении за счет сцепления между частицами вещества.

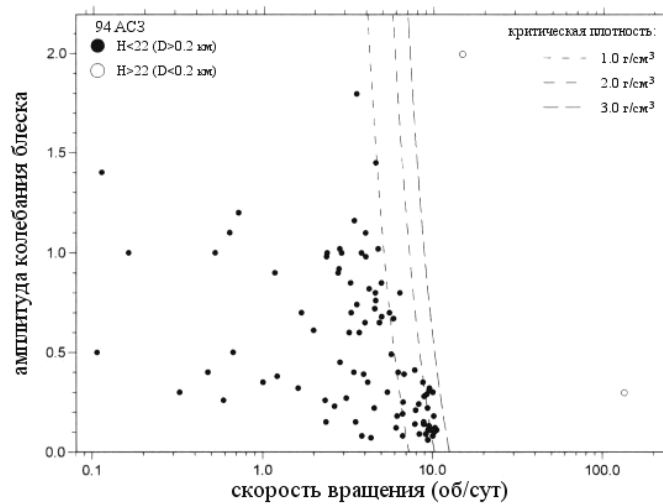


Рис. 18. Распределение скоростей вращения АСЗ в зависимости от полной вариации блеска за период.

Еще одной примечательной особенностью АСЗ с размерами от нескольких сот метров до 10 км является корреляция между амплитудой колебания блеска и скоростью вращения. На рис. 19 (Pravec and Harris, 2000) представлено среднее значение амплитуды колебаний блеска для таких астероидов в зависимости от частоты вращения. Вертикальными черточками отмечены средние ошибки отложенных значений величины средней амплитуды. Начиная со значений 5 оборотов в сутки, намечается устойчивая тенденция к уменьшению средней амплитуды блеска. Эта тенденция, как и ранее рассмотренные особенности, свидетельствуют в пользу того, что быстро вращающиеся астероиды представляют собой агрегаты слабо связанных обломков. Можно думать, что по мере увеличения скорости вращения сила, прижимающая обломки друг к другу, уменьшается, что ведет к их большей подвижности и постепенному уменьшению отношения самой большой из полуосей фигуры астероида к двум другим.

Наконец, в данном разделе следует упомянуть о том, что ряд АСЗ, в том числе потенциально опасных астероидов, обнаруживает такие особенности световых кривых, которые не могут быть объяснены иначе, как явлениями затмений и покрытий в двойных системах (рис. 20, (Pravec et al., 2000)). Глубокие минимумы на кривой блеска обусловлены прохождением спутника и/или его тени по диску главного компонента двойного астероида, а менее глубокие плоские минимумы — обусловлены прохождением спутника за диском планеты или попаданием его в тень, отбрасываемую главным компонентом. Изучение кривых блеска позволяет определить параметры двойной

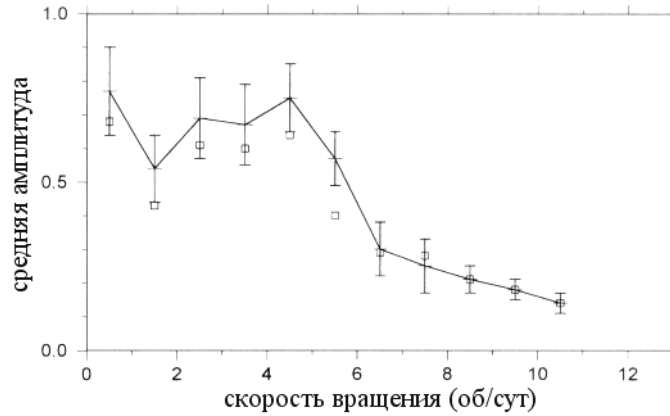


Рис. 19. Среднее значение амплитуды колебаний блеска АСЗ размерами от нескольких сот метров до 10 км в зависимости от частоты вращения.

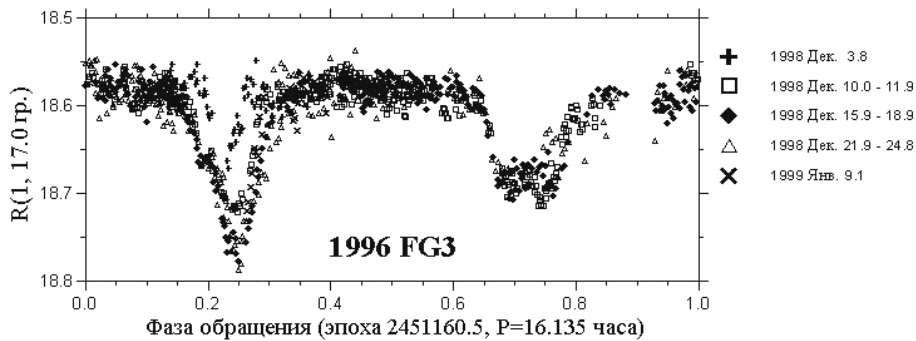


Рис. 20. Долгопериодическая составляющая кривой блеска АСЗ 1996 FG₃

системы, такие как диаметр главного компонента, отношение диаметра спутника к диаметру главного компонента, большую полуось орбиты спутника, период вращения главного компонента и период обращения спутника и т.д. К настоящему времени среди АСЗ найдено около полутора десятков двойных систем (<http://www.asu.cas.cz/asteroid/binneas.htm>). Количество двойных астероидов среди АСЗ оценивается на основе статистики открытий как 17% (Pravec et al., 1999). Примерно такой же процент двойных АСЗ был найден в работе (Bottke and Melosh, 1996) на основе статистики двойных кратеров на поверхностях Венеры и Земли. Это очень большой процент, который нуждается в объяснении. В нескольких работах (Bottke and Melosh, 1966) и др. был предложен механизм, согласно которому двойные АСЗ образуются в результате приливного распада “rubble piles” во время их тесных сближений с планетами земной группы. Быстрое вращение астероидов может способствовать эффективности подобного механизма. Действительно, главные ком-

поненты обнаруженных двойных АСЗ, имеют в большинстве случаев очень быстрое вращение. Многие двойные АСЗ имеют малую объемную плотность, что характерно для “rubble piles”.

9. Показатели цвета

Различные приемники излучения, в том числе человеческий глаз, обладают различной чувствительностью к лучам различных длин волн. Человеческий глаз наиболее чувствителен к желтым и зеленым, в то время как несенсибилизированная фотопластинка наиболее чувствительна к лучам синей и фиолетовой части спектра. Поэтому одно и то же светило в зависимости от цвета по-разному воспринимается глазом и фотопластинкой. Два светила различного цвета, воспринимаемые глазом как имеющие одинаковый блеск, на фотопластинке оставляют различные изображения. Чтобы иметь возможность сравнивать между собой оценки блеска светил, получаемые с помощью разных приемников излучений, в астрономии строятся фотометрические системы, характеризующиеся набором спектральных полос и их шириной. Единственно употребляемая в настоящее время для малых планет фотометрическая система есть система UBV , разработанная Джонсоном и Морганом (Johnson, 1955). Эта система включает три основные полосы спектра: полосу U (ультрафиолетовая, эффективная длина волны 0.365 мкм, ширина 0.068 мкм), B (синяя, эффективная длина волны 0.440 мкм, ширина 0.098 мкм) и V (визуальная, эффективная длина волны 0.550 мкм, ширина полосы 0.089 мкм). Иногда их дополняют полосами в красной и инфракрасной областях спектра. Напомним, что человеческий глаз воспринимает свет в интервале длин волн приблизительно от 0.4 мкм до 0.7 мкм при максимуме чувствительности около 0.550 мкм. Отметим также, что звездные величины светил в различных полосах системы UBV принято обозначать теми же буквами, которые используются для обозначения полосы.

На практике UBV фотометрия может быть достаточно просто реализована с помощью системы фильтров, имеющих соответствующие полосы пропускания света.

Показателями цвета, или колор-индексами светил, называют величины $B - V$ и $U - B$ (см. таблицу 1 Приложения), т.е. разности между звездными величинами светила в разных участках спектра. Показатели цвета могут служить характеристикой цвета светила или характеристикой распределения энергии в его спектре. Нуль-пункт фотометрической шкалы UBV подобран таким образом, чтобы для звезд спектрального класса A_0 значения колор-индексов $U - B$ и $B - V$ были равны нулю. Для бело-голубых звезд спектральных классов O и B колор-индексы отрицательны, так как максимум излучения этих звезд смещен к ультрафиолетовому участку спектра и их звездные величины в лучах U меньше, чем в лучах B , а в лучах B меньше,

чем в лучах V . Напротив того, колор-индексы звезд спектральных классов F , G , K , M , более холодных, чем звезды класса A , положительны. Солнце (класс $G2$) имеет колор-индексы $U - B = +0.10$ и $B - V = +0.63$ (Герелс, 1974).

Если бы поверхности астероидов были бы абсолютно белыми, то их колор-индексы не отличались бы от солнечных. На самом деле это не так. Тщательное определение колор-индексов астероидов показывает, что $B - V$ лежат в пределах приблизительно от $+0.6$ до $+0.95$ звездной величины, а значения $U - V$ лежат в пределах от $+0.7$ до $+1.5$ звездной величины (для Солнца $U - V = +0.73$). Таким образом, поверхности астероидов отличаются по своему цвету. Сопоставление колор-индексов астероидов с альбедо их поверхностей показывает, что между теми и другими существует определенная корреляция, которая может быть использована для их классификации.

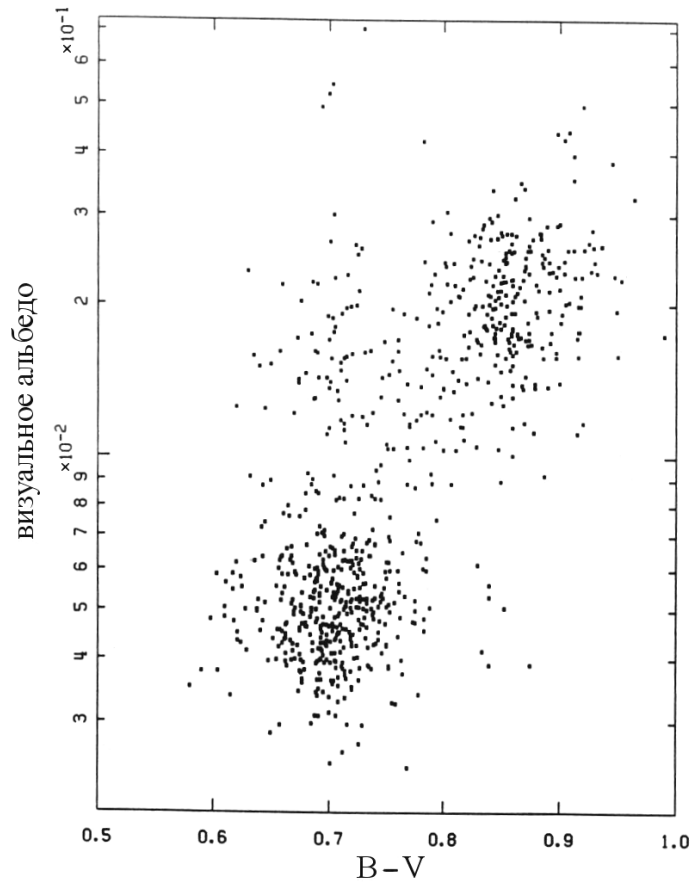


Рис. 21. Зависимость альbedo от показателя цвета $B - V$

На рис. 21 и 22 (Veeder and Tedesco, 1992) хорошо заметно, что распределение колор-индексов, как и распределение альbedo, имеет бимодальный ха-

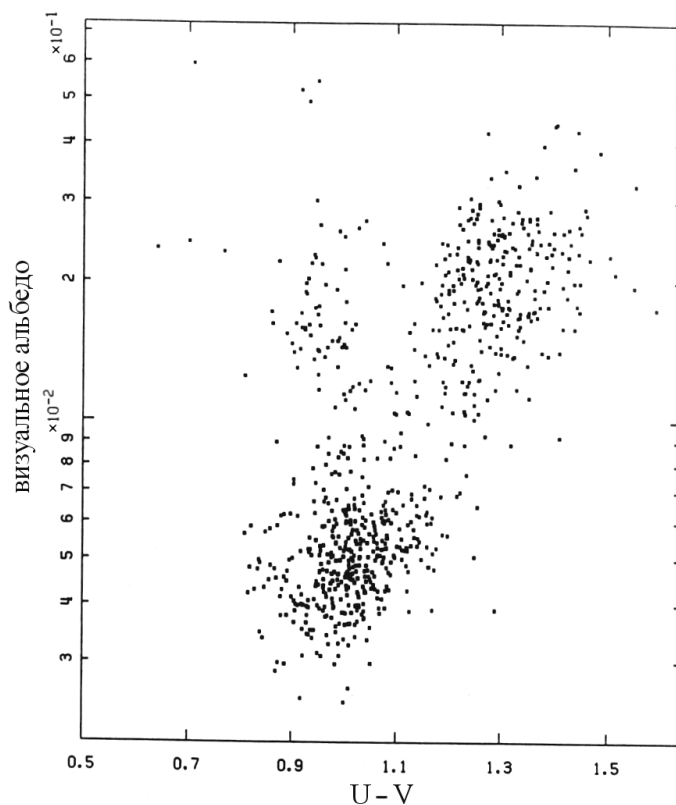


Рис. 22. Зависимость альbedo от показателя цвета $U - V$

рактически. Одна группа «красноватых» астероидов, концентрирующаяся вверху справа, имеет большие значения колор-индексов и сравнительно большие альbedo. Другая группа астероидов внизу слева имеет существенно меньшие значения колор-индексов и небольшие по величине альbedo. Эта корреляция позволяет путем достаточно легко выполняемого определения колор-индекса астероида получить некоторое представление о его альbedo и, следовательно, о его фотометрическом диаметре (если определены элементы орбиты и произведена оценка абсолютной звездной величины астероида). Кроме того, знание колор-индекса, как это будет видно в дальнейшем, позволяет также сделать предварительное заключение о вероятном минералогическом и композиционном составе астероида.

10. Таксономическая классификация астероидов

До 70-ых годов прошлого века мало что было известно о физических свойствах и минералогическом составе астероидов. Предположение о том, что метеориты являются осколками астероидов, не было в досточной мере под-

креплено наблюдательными данными. Положение стало меняться, когда в конце 60-ых годов были разработаны и стали применяться на практике поляриметрический и радиометрический методы определения альbedo астероидов. Очень скоро выяснилось, что альbedo различных астероидов варьируется в широких пределах от нескольких до многих десятков процентов и потому может являться важным индикатором различий между объектами. Кроме того, когда были сопоставлены альbedo десятков астероидов, стало ясно, что распределение астероидов по величине альbedo имеет бимодальный характер: достаточно четко просматривалось наличие двух групп астероидов, темных, со значениями альbedo, группирующимися около 0.03–0.05, и светлых с медианным значением около 0.15 при явном недостатке или, как сначала казалось, полном отсутствии значений альbedo около 0.1 (рис. 13). Имеющиеся для многих астероидов значения колор-индексов также указывали на наличие двух групп астероидов.

Первая физическая классификация астероидов, или их таксономия, отражала эту бимодальность распределения. Как уже указывалось в одном из предыдущих параграфов, астероиды с низкими альbedo были отнесены к классу углистых, или *C*-астероидов, поскольку наиболее вероятной субстанцией, обеспечивающей их низкое альbedo, является углерод, обильно представленный в метеоритах — углистых хондритах. Астероиды с высоким альbedo были отнесены к широкому классу каменных астероидов, получивших обозначение *S* (от “stony” — каменный). Объекты, которые не вписывались в эту классификацию, на первых порах получили обозначение *U* (от “unclassified” — неклассифицируемые).

Большую роль в дальнейшей классификации астероидов сыграло изучение их спектральной отражательной способности, т.е. изменения альbedo в зависимости от длины волны света. Альbedo различных веществ, в том числе альbedo поверхностных слоев астероидов, зависит от длины волны света. Сравнивая лучистую энергию, падающую на поверхность в определенном диапазоне длин волн, с отраженной энергией в данном диапазоне (фактически, с измерением блеска) можно определить альbedo как функцию длины волны. Практически измерение альbedo в различных участках спектра до середины 80-ых годов прошлого века производилось с помощью системы более или менее узкополосных фильтров (в настоящее время с этой целью используется комбинация спектрографа и ПЗС-приемника излучения; см. ниже). Плавная кривая, соединяющая найденные значения альbedo в различных участках спектра, представляет собой кривую спектральной отражательной способности.

Теоретические соображения и эксперименты с различными образцами метеоритного вещества, чистыми минералами и их смесями показывают, что форма кривой и величина альbedo в различных участках спектра могут характеризовать состав и состояние поверхностных слоев астероидов. Для

ряда распространенных в метеоритах минералов, таких как пироксен и оливин, характерные особенности кривых (полосы поглощения) лежат близко к красному концу видимого спектра или в ближней инфракрасной области. Поэтому важно было распространить исследование отражательной способности астероидов на красную и инфракрасную область, которые не охватывались стандартной *UBV* фотометрией. В работе (Charman and Gaffey, 1979) были изучены спектры почти трехсот астероидов, полученные с помощью большого числа, до двадцати пяти светофильтров, покрывающих диапазон длин волн от 0.3 до 1.1 мкм. В дальнейшем спектральные кривые были получены для почти шестисот астероидов с помощью восьми более широкополосных фильтров, покрывающих тот же диапазон длин волн (Zellner et al., 1985). Эти работы послужили основой для разработки наиболее употребительной таксономии астероидов по Толену (Tholen, 1984).

Толен подразделил совокупность исследованных астероидов на 14 классов (некоторые из них появились ранее в работах других исследователей) в соответствии с характерными особенностями кривых спектральной отражательной способности и значением визуального альbedo. Возможная интерпретация спектров при этом не учитывалась. Принадлежность астероидов к одному классу не предполагает обязательного сходства их минералогического состава. Вместе с тем, как оказалось, классификация по Толену отражает некоторые важные минералогические особенности астероидов и их термическую историю.

На рис. 23 (Tholen, Barucci, 1989) приведены усредненные отражательные спектры астероидов 14 классов, каждый из которых обозначен одной буквой. Спектральная кривая, обозначенная как EMP, является общей для трех классов E, M и P. Эти три класса различаются характерными для них значениями альbedo. В тех случаях, когда информация о величине альbedo отсутствует, все три класса объединяются в таксономии по Толену в один класс X. В некоторых случаях, когда тот или иной астероид бывает затруднительно отнести к определенному классу, допускается использование для его характеристики нескольких букв, чтобы указать наличие черт, характерных для соответствующих классов.

Еще с 70-ых годов прошлого века стало известным, что вид астероидных спектров в видимой области определяется тремя основными чертами: 1) наличием более или менее глубокой, вплоть до почти полного отсутствия, полосы поглощения в области, близкой к ультра-фиолетовому концу спектра, обусловленной взаимодействием фотонов с ионами железа Fe_2^+ в кристаллической решетке вещества поверхностных слоев астероидов; 2) общим наклоном спектральной кривой в области 0.55 мкм и далее с увеличением длины волны света; наклон (подъем к красному концу спектра или отсутствие такового) обусловлены наличием или отсутствием субстанции, вызывающей покраснение спектра; в качестве такой субстанции могут выступать металлы (Fe,

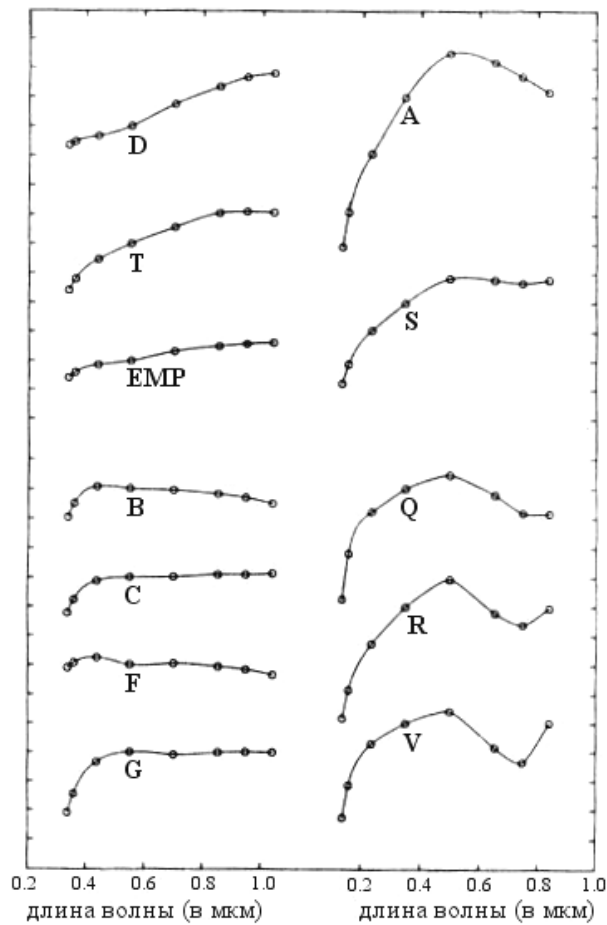


Рис. 23. Осредненные спектры астероидов различных классов

Ni) или органические соединения; 3) присутствием или отсутствием полосы поглощения, обусловленной силикатами, в области от 0.7 мкм и более с минимумом обычно около 1 мкм. Все три характерные особенности спектров легко просматриваются на рис. 23. Более детальное описание таксономи по Толену содержится в таблице 10, заимствованной из работы (Lupishko and Di Martino, 1998). В последней графе таблицы указываются возможные метеоритные аналоги для астероидов каждого класса. Заметим, что класс *K*, отсутствовавший в оригинальной работе Толена, был введен Беллом специально для описания семейства Эос малых планет.

В числе метеоритных аналогов различных классов малых планет в таблице встречаются представители всех трех типов метеоритов: железных, состоящих в основном из железо-никелевого сплава с небольшой примесью иного вещества, железо-каменных, состоящих в среднем на 50% из никелистого же-

леза и на 50% из силикатных минералов, и каменных, состоящих в основном из силикатных минералов с примесью никелистого железа. Минералы оливин $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ и ортопироксен $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ — наиболее распространенные в метеоритах силикатные минералы, присутствующие в различных пропорциях в метеоритах почти всех типов.

Обыкновенные хондриты, углистые хондриты, базальтовые и энстатитовые ахондриты, обриты — это различные типы каменных метеоритов. Хондриты отличаются от ахондритов составом и структурой. Характерной особенностью структуры хондритов являются содержащиеся в них округлые зерна вещества — хондры, размером от долей миллиметра до долей сантиметра. По своему химическому составу хондриты гораздо ближе к химическому составу Солнца по сравнению с земной корой. Вероятно, хондриты не прошли через стадию химической дифференциации вещества, которая на Земле обеспечивалась процессами плавления, выветривания, отложения осадков и т.п.

Углистые хондриты отличаются малым удельным весом, рыхлостью, присутствием в них гидратированных минералов и органических соединений. Состав углистых хондритов близок к тому, который можно ожидать у продукта конденсации первичного околосолнечного вещества.

Ахондриты — это каменные метеориты, не содержащие в своей структуре хондр. По своему составу они сходны с земными изверженными породами, не содержащими никелистого железа.

Минералогический состав большинства выпадающих на Землю метеоритов свидетельствует о том, что они сформировались в недрах достаточно крупных тел, с характерными размерами от нескольких десятков до сотен километров. Вещество различных типов метеоритов может быть подразделено на три широких класса:

- примитивное вещество, наиболее близкое по составу к предполагаемому составу протопланетного вещества, не претерпевшее высокотемпературной диссоциации;
- вещество, подвергшееся нагреву до нескольких сотен градусов и претерпевшее при этом метаморфизм;
- вещество, подвергшееся полному или частичному расплавлению, которое привело к разделению его на фракции.

Малые планеты, принадлежащие к различным классам, также могут быть подразделены на три большие группы (Bell et al., 1989), которые соответствуют указанному выше подразделению метеоритного вещества по степени его температурного метаморфизма. При этом малые планеты, принадлежащие классам *D*, *P*, *C*, состоят из наиболее примитивного вещества.

Таблица 10. Таксономическая классификация астероидов

Класс	Альбедо	Краткое описание/локализация	Минералогия, метеоритные аналоги
P	<0.06	Очень темные и почти нейтрального цвета, спектр без особенностей	Органические соед., безводные силикаты
D	0.04–0.09	Темные и красноватые; альбедо сильно возрастает с длиной волны, возможна полоса поглощения около 2.2 мкм; внешняя часть главного пояса	Керогеноподобные органические вещества, безводные силикаты
C	0.04–0.09	Плоский с покраснением спектр, слабое поглощение в УФ, может иметь полосу поглощения около 3 мкм, обусловленную гидратированными силикатами	Филосиликаты, углистые хондриты
B	0.04–0.09	C-подкласс, слабое поглощение в УФ, может иметь поглощение около 3 мкм	Гидратированные силикаты, углистые хондриты
F	0.04–0.09	C-подкласс, слабое до исчезающего поглощение в УФ, может иметь полосу поглощения около 3 мкм	То же самое, что и B-класс
G	0.06–0.10	C-подкласс, сильное поглощение в УФ при $\lambda < 0.4$ мкм, плоский спектр от визуальной до близкой инфракрасной области, полосы поглощения около 0.6–0.7 и 3 мкм	Гидратированные силикаты, филосиликаты, углистые хондриты
T	0.06–0.10	Широкая полоса поглощения в УФ и визуальной области, плоский спектр в близкой ИК области	(Троилит, металлы)
K	~0.09	S-подобный спектр в визуальной области; слабая полоса поглощения около 1 мкм., плоский спектр от 1.1 до 2.5 мкм; семейство Эос	Углистые CV-CO хондриты
S	0.10–0.30	Полосы поглощения в области от УФ до $\lambda < 0.7$ мкм, 1 мкм (и, возможно, 2 мкм), возрастание альбедо в видимой — близкой ИК области, значительные вариации спектров	Пироксен, оливин, металл
M	0.12–0.20	Спектр без особенностей с подъемом к красному концу, подобен P и E классам, вариация в близкой ИК области, высокое радарное альбедо	Железо-никелевый сплав, энстатит
Q	0.16–0.21	Сильное поглощение по обе стороны от 0.7 мкм, особенно в УФ, сильное поглощение (оливин, пироксен) около 1 мкм, отсутствие подъема к красному концу спектра; редкий класс	Обыкновенные хондриты

Таблица 10. (продолжение)

Класс	Альbedo	Краткое описание/локализация	Минералогия, метеоритные аналоги
A	0.17–0.35	Сильное поглощение в УФ и около 1 мкм (оливин). отсутствие полосы поглощения около 2 мкм; редкий класс	Оливиновые ахондриты, палласиты
V	0.23–0.40	Сильное поглощение в УФ и при $\lambda < 0.7$ мкм, полосы поглощения около 1.0 и 2.0 мкм, слабая особенность около 1.5 мкм; редкий класс	Базальтовые ахондриты
R	0.30–0.40	Сильное поглощение в УФ и при $\lambda < 0.7$ мкм, полосы поглощения около 1.0 и 2.0 мкм, подъем к красному концу спектра; редкий класс	Пироксен, оливин + металл (или без него)
E	0.40–0.55	Самое высокое альbedo, спектр без особенностей с подъемом к красному концу, подобен P и M типам, слабые изменения в ближней ИК области; внутренняя часть главного пояса астероидов	Энстатитовые ахондриты, обриты

Малые планеты, входящие в классы T , $B + G + F$, образуют группу тел, подвергшихся умеренному нагреванию. Наконец, малые планеты, классифицируемые как V , R , S , A , M , E , образуют группу малых планет с наиболее дифференцированным веществом, претерпевшим ту или иную степень расплавления. В частности, малые планеты, относящиеся к V -классу (одна из крупнейших малых планет Веста и ряд небольших по размеру АСЗ), имеют состав поверхностных слоев, идентичный составу базальтовых ахондритов, являющихся продуктом высокотемпературного плавления.

В таблице 10 указанное подразделение малых планет на суперклассы с некоторыми вариациями соответствует переходу от верхней части таблицы к ее середине и затем к нижней части.

Наличие аналогии между различными классами малых планет и классами/ типами метеоритов не означает, что эта аналогия не имеет противоречий. Достаточно сказать, что наиболее распространенный тип метеоритов — обыкновенные хондриты являются аналогом редкого Q -класса малых планет, который встречается только среди АСЗ. Некоторые классы малых планет, такие как примитивные P , D -классы, вообще не имеют аналогов среди метеоритов. Дело, очевидно, в том, что падающие на Землю метеориты не являются «репрезентативной выборкой» вещества астероидов. Как будет отмечено чуть позже, астероиды, сближающиеся с Землей, также обнаруживают специфические особенности классификации по сравнению с астероидами главного пояса.

Пожалуй, наиболее замечательным результатом классификации малых планет является обнаружение зависимости частоты встречаемости различных классов от большой полуоси орбиты, или среднего расстояния планеты от Солнца. Так, малые планеты класса *E* во много раз чаще встречаются вблизи внутреннего края пояса, на расстояниях около 1.9 а.е. от Солнца, чем в районе внешнего края пояса, на расстояниях около 3 а.е. Пик встречаемости малых планет класса *S* приходится на 2.2–2.3 а.е., класс *C* многочисленнее всего на внешнем краю главного пояса, а примитивные *P* и *D* классы обильнее всего представлены соответственно планетами группы Гильды и троянцами (рис. 24 (Bell et al., 1989)).

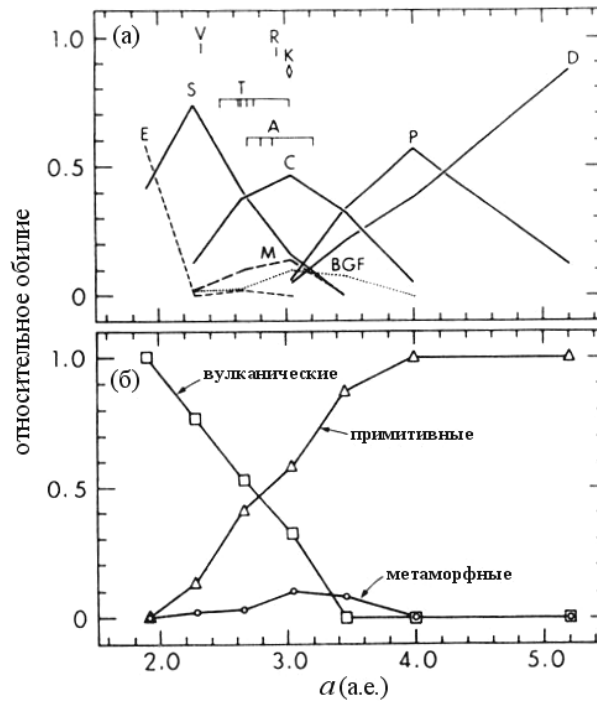


Рис. 24. Относительное обилие астероидов различных классов в зависимости от расстояния от Солнца (большой полуоси орбиты)

На рис. 24 отчетливо видно, что распределение астероидов между супер-классами примитивных, метаморфных и вулканических четко коррелирует с расстоянием от Солнца: вулканические преобладают на внутреннем краю, в то время как примитивные — на внешнем, а метаморфные представлены в зоне от 2.0 до 4.0 а.е. Это наводит на мысль, что разогрев вещества астероидов, который обеспечил выплавление железо-никелевой фракции и ахондритного вещества, быстро убывал с расстоянием от Солнца. Предложено два сценария для обеспечения эффективного разогрева планетезималей на ранней

стадии формирования Солнечной системы. Первый из них — это радиоактивный распад короткоживущего изотопа алюминия ^{26}Al . Этот сценарий может обеспечить наблюдаемое соотношение астероидов различных классов, если процесс формирования планетезималей начался вблизи Солнца и быстро распространился до орбиты Юпитера за время, сравнимое периодом полураспада ^{26}Al (720000 лет). Правда, для этого требуется, чтобы протопланетное облако непосредственно перед началом формирования планетезималей было обогащено короткоживущим изотопом алюминия (взрыв сверхновой?). Другой сценарий — это магнитно-индукционный разогрев планетезималей потоками заряженных частиц, выбрасываемых Солнцем во время прохождения им стадии развития, характерной для Т Тельца.

Так или иначе, несмотря на имевшее место перемешивание вещества в поясе астероидов, в нем до сих пор сохранились свидетельства неоднородности физико-химических условий, существовавших в первичном протопланетном облаке и внутри формирующихся малых планет на начальной стадии образования Солнечной системы. При этом достаточно отчетливо прослеживается связь между температурным метаморфизмом вещества малых планет и их расстоянием от Солнца.

В связи с проблемой астероидной опасности особый интерес представляет таксономия астероидов, сближающихся с Землей. К настоящему времени достаточно точно классифицировано лишь порядка ста АСЗ. Их распределение по различным классам представлено на рисунке 25 (Лупишко и Лупишко, 2001).

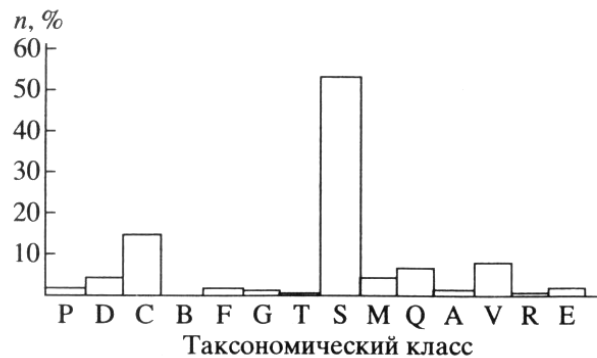


Рис. 25. Распределение АСЗ по таксономическим классам (в процентах)

Среди АСЗ имеются представители почти всех классов, кроме, быть может, одного-двух классов, если их представители были классифицированы ошибочно. Бросается в глаза преобладание *S*-астероидов, число которых в три раза превосходит количество *C*-астероидов и близких к ним астероидов *B*, *F*, *G*-классов. В главном поясе, рассматриваемом как целое, имеет место противоположное соотношение. Быть может, все дело в наблюдательной

селекции, которая «работает» в пользу более светлых и потому более заметных астероидов? В работах (Lupishko, Di Martino, 1998; Лупишко и Лупишко, 2001) показано, что хотя селекция действительно увеличивает число открытых и классифицированных светлых астероидов, тем не менее, преобладание *S*-астероидов среди АСЗ является реальным. Естественное объяснение этому факту заключается в том, что пополнение популяции АСЗ происходит в основном за счет астероидов, движущихся ближе к внутреннему краю пояса.

Здесь уместно вновь вернуться к вопросу о том, вещество какого типа астероидов является аналогом обычных хондритов, составляющих примерно 80% всех метеоритов, наблюдавшихся при падении. По спектральным характеристикам наиболее близки к обычным хондритам астероиды *Q* типа. Но *Q*-астероиды не представлены в главном поясе и даже среди АСЗ их существенно меньше чем *S*-астероидов. Почему же среди метеоритов доминируют обычные хондриты? В ряде работ было показано, что спектры *S*-астероидов демонстрируют определенную тенденцию приближения к спектрам обычных хондритов по мере уменьшения размеров астероидов. Возможное объяснение этой тенденции заключается в следующем. С уменьшением размеров астероида уменьшается и средняя продолжительность его существования как консолидированного тела до его распада в результате столкновения с другими телами. В результате можно утверждать, что по мере уменьшения размеров исследуемых астероидов наблюдатели имеют дело со все более «молодыми», все более свежими поверхностями. Отсюда вытекает, что указанная выше тенденция может быть вызвана постепенным изменением отражательных свойств *S*-астероидов под влиянием «космического выветривания» (Binzel et al., 2002). Хотя не все имеющиеся факты укладываются в эту схему, она, тем не менее, открывает путь к объяснению связи обычных хондритов с наиболее распространенным на внутреннем краю пояса и среди АСЗ классом астероидов.

Другим веским подтверждением этой связи явились результаты обследования достаточно типичного *S*-астероида (433) Eros с помощью космического аппарата NEAR. По данным различных приборов, установленных на аппарате, элементный состав Эроса согласуется с составом обычных хондритов, хотя зафиксирован недостаток серы. Вещество Эроса может быть подобным обычным хондритам, хотя отнести его состав к определенной петрологической группе не удастся (Chang, 2002).

Хотя было сделано несколько попыток расширения и усовершенствования описанной выше таксономии астероидов, она до сих пор остается наиболее употребительным стандартом. Таксономия по Толону как и ряд других таксономий основывается на классификации спектральных кривых астероидов, полученных с помощью некоторого числа светофильтров. Но уже с середины восьмидесятых годов прошлого века стала развиваться новая техника получения и измерения спектров астероидов при помощи щелевых спектро-

графов, в которых в качестве светоприемника используются ПЗС-матрицы. Разложение пучка света с спектр в таких спектрографах осуществляется с помощью дифракционной решетки или комбинации решетки и призмы. Получаемый спектр направляется на ПЗС-матрицу, где он распределяется на большое число пикселей. Этим путем удается в течении одной экспозиции зарегистрировать различную интенсивность света (освещенность) в различных участках спектра. Результирующая кривая интенсивности сравнивается с аналогичной кривой, полученной для звезды того же самого или близкого спектрального класса с Солнцем. Описанный в самых общих чертах метод позволяет построить кривую, показывающую отношение отраженного от астероида света к упавшему в зависимости от длины волны, то есть кривую спектральной отражательной способности.

Эта технология обладает рядом очевидных преимуществ по сравнению с использованием светофильтров: она позволяет получать спектры со значительно большим разрешением и притом для существенно более слабых объектов. Технология позволяет одновременно измерять спектр астероида и ночного неба и затем вводить коррекцию за вариацию атмосферных условий. Поскольку экспозиция длится относительно короткий промежуток времени, практически исключается неопределенность, связанная с возможным изменением цветовых характеристик астероида при его вращении.

Указанным способом к настоящему времени получены спектры порядка 3000 астероидов (Bus et al., 2002). В работе (Bus and Binzel, 2002a) единообразным способом получены спектры 1447 астероидов. Это позволило авторам предложить новую таксономию астероидов, которая полностью основывается на анализе их спектров (Bus and Binzel., 2002b). Благодаря большому разрешению и обилию спектров был подмечен ряд особенностей спектров, которые оставались невыявленными в предшествующих работах. Анализ почти полутора тысяч спектров обнаружил отсутствие резко выраженных линий разделов между различными типами спектральных кривых, за исключением одного случая. Тем не менее, для сохранения приемственности с устоявшимися представлениями было решено в основном сохранить здание таксономии по Толену, с одной стороны, расширив его, с другой, подразделив его на более мелкие составляющие, где это было возможно и необходимо.

Всего в новой таксономии содержится уже 26 классов. Тринадцать классов имеют однобуквенные обозначения: A, B, C, D, K, L, O, Q, R, S, T, V и X. При этом классы A, B, D, Q, R, T и V совпадают с классами Толена. Класс K был введен еще Беллом (Bell, 1988). Класс O — абсолютно новый с четырьмя известными членами. Два новых класса L и S выделены из S-класса Толена. Астероиды с промежуточными спектральными свойствами получили многобуквенные обозначения: C_b , C_g , C_{gh} , C_h , L_d , S_a , S_k , S_l , S_r , S_q , X_c , X_e и X_k . При этом классы X, X_c , X_e и X_k выделены в пределах X-класса Толена, который охватывал классы E, M и P, если более тонкая дифференциация (по

величине альбедо) была невозможна. Классы C_g , C_{gh} выделены в пределах G-класса Толена, классы C и C_h ранее были представлены в классе C . Наконец, наиболее широкий класс S Толена в новой таксономии представлен набором классов L , L_d , S , S_a , S_k , S_l , S_r , S_q .

Из-за того что спектральные характеристики астероидов фактически меняются непрерывным образом и поскольку две таксономии основаны на несколько различающихся принципах, соответствие между классами обеих таксономий не всегда строго выдерживается. Тем не менее, это соответствие отражает приемственность двух таксономий. В то же время новая таксономия дает возможность более точного описания спектральных характеристик астероидов и позволяет глубже проникнуть в минералогию вещества, из которого они сложены. В качестве примера укажем на X-комплекс с бесструктурными спектрами в таксономии Толена. Новая технология позволила выявить в спектрах характерные особенности, дающие основание подразделить комплекс на четыре класса X , X_c , X_e и X_k , причем в спектрах астероидов типа X_e присутствует полоса поглощения, ассоциируемая с минералом троилитом.

В таблице 1 Приложения спектральная классификация потенциально опасных астероидов приводится в том виде, как она дана в оригинальных исследованиях. В большинстве случаев классификация соответствует таксономии по Толону либо только что описанной таксономии. В случае (25143) 1998 SF₃₆ использована классификация, данная в работе (Gaffey et al., 1993), в которой 39 исследованных астероидов S-комплекса были подразделены в соответствии с их спектрами на семь подклассов (S(I)–S(VII)), начиная от оливин-обогащенных и кончая ортопироксен-обогащенными. Таким образом, спектр подкласса S(IV) соответствует оливин-пироксеновой смеси.

Классификация сверена с данными работы (Binzel et al., 2002) и с данными приведенными на сайте <http://earn.dlr.de.nea/>.

Отметим, что обширные базы данных о физических и динамических свойствах астероидов, сближающихся с Землей, можно найти по следующим адресам: <http://earn.dlr.de.nea/>; <http://pdssbn.astro.umd.edu/sbnhtml/index.html>.

11. Минимальное расстояние между орбитами — параметр *MOID*

При решении вопроса о том, возможно ли столкновение двух тел на заданных гелиоцентрических орбитах, первостепенное значение имеет знание минимального расстояния между этими орбитами и оценка его точности. Если минимальное расстояние между орбитами существенно превосходит радиус Земли, то столкновение между ними по крайней мере при ближайшем сближении произойти не может. Ранее уже отмечалось, что величина минимального расстояния между орбитой АСЗ и орбитой Земли (параметр *MOID* — Minimum Orbital Intersection Distance) служит критерием для выделения по-

тенциально опасных астероидов из числа всех АСЗ: к их числу относят те тела, которые имеют значение параметра $MOID$ в настоящую эпоху меньше чем 0.05 а.е., и абсолютную звездную величину $H \leq 22.0^m$ (см. §3). Поскольку элементы орбит небесных тел, в том числе и Земли, подвержены изменениям, то и минимальные расстояния между ними не остаются постоянными. Для большинства тел Солнечной системы характерны прогрессивные изменения долгот перигелиев и узлов (прямые для перигелиев и попятные для узлов) под влиянием взаимных возмущений. Поскольку темп этих изменений зависит от величины большой полуоси орбиты, то в результате оказывается, что орбиты большинства малых планет типа Аполлона и типа Амура периодически (с периодами от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч лет) пересекают орбиту Земли. Кроме того, на эти прогрессивные изменения накладываются квазипериодические колебания, обусловленные изменениями взаимных расстояний возмущаемых и возмущающих планет и, следовательно, изменением их взаимных возмущений. В частности, гелиоцентрическая орбита Земли испытывает изменения с периодом около одного месяца под влиянием притяжения Луны. В результате этого минимальное расстояние между орбитой астероида и Земли также подвержено изменению с периодом около одного месяца, причем по величине оно может достигать нескольких тысяч километров.

Минимальное расстояние между двумя орбитами достигается вдоль некоторой прямой, которая перпендикулярна к орбитам обоих тел, т.е. перпендикулярна к касательным, проведенным к орбитам в точках, находящихся на минимальном для данных орбит расстоянии. Точки двух софокусных орбит, находящиеся на минимальном расстоянии, и величина самого расстояния могут быть найдены аналитически или численным способом. В общем случае задача сводится к решению тригонометрического уравнения восьмой степени (Kholshchevnikov and Vassiliev, 1999). Существует большое число полуаналитических и численных способов нахождения минимального расстояния между орбитами (см., например, (Sitarski, 1968)). Простейший алгоритм сводится к определению расстояний между фиксированной точкой одного конического сечения и точками другого, которые выбираются с некоторым шагом, и уточнению локальных минимумов путем дробления шага. Затем осуществляется перебор точек первого конического сечения с последующим выбором минимального из локальных минимумов. Подобный алгоритм не гарантирует нахождения всех близко расположенных минимумов, но для практических целей он достаточен. Этим путем были найдены значения параметра $MOID$, указанные в табл.1 Приложения. Элементы орбит брались при этом на ближайшую стандартную эпоху. При более точных расчетах элементы двух орбит следует брать на момент, близкий к моменту входа астероида в сферу действия Земли (см. §15). При оценке точности вычисления $MOID$ следует учитывать погрешность элементов орбит Земли и астероида, а также коле-

бания этой величины с месячным периодом.

12. Скорость соударения тела с Землей

Скорость соударения астероида или кометы с Землей может быть вычислена, если известны гелиоцентрические элементы орбиты тела. Точнее всего эта скорость может быть найдена в процессе численного интегрирования уравнений движения, когда решается задача о соударении тела с Землей. При этом координаты и скорости тела определяются на каждом шаге с учетом притяжения Солнца, Земли, иных возмущающих планет и других факторов. Для получения менее точных оценок скорости соударения можно воспользоваться более простым способом, вычисляя сначала скорость астероида относительно Солнца по формулам невозмущенного движения. При этом можно воспользоваться элементами орбиты астероида на какую-либо эпоху, не очень удаленную от момента сближения. Затем следует вычислить скорость астероида относительно Земли без учета ее притяжения (скорость в невозмущенном движении), для чего следует вычесть из гелиоцентрической скорости астероида скорость Земли. Наконец, надо вычислить скорость соударения с учетом притяжения Земли.

Если обозначить вектор гелиоцентрической скорости астероида в момент столкновения как \mathbf{v} с компонентами v_x, v_y, v_z , а вектор гелиоцентрической скорости Земли в этот момент как $\mathbf{V}(V_x, V_y, V_z)$, то скорость тела относительно Земли без учета ее притяжения равна

$$\hat{v} = \sqrt{((v_x - V_x)^2 + (v_y - V_y)^2 + (v_z - V_z)^2)}. \quad (12.1)$$

Эту скорость относительно Земли, еще не измененную ее притяжением, часто называют гиперболическим избытком скорости. Полная скорость соударения с Землей находится по формуле

$$\tilde{v} = \sqrt{(\hat{v}^2 + v_\infty^2)}, \quad (12.2)$$

где v_∞ — параболическая скорость относительно Земли, т.е. скорость, которую приобретает тело, падающее на Землю «из бесконечности», где его скорость относительно Земли равна нулю. Параболическая скорость относительно Земли приближенно равна 11.18 км/с.

Орбиты астероидов, включенных в таблицу 1 Приложения, в настоящее время не пересекаются с орбитой Земли. Поэтому при вычислении скоростей гипотетических столкновений \tilde{v} по формулам (12.1) и (12.2) приходится использовать скорости $\mathbf{v}(v_x, v_y, v_z)$ и $\mathbf{V}(V_x, V_y, V_z)$ не в точках столкновений, а в близких к ним точках. При вычислении данных таблицы 1 Приложения использовались те точки двух орбит, которые находятся в настоящее время на минимальных для этих орбит расстояниях.

Отметим, что средние скорости столкновения АСЗ с Землей (с учетом притяжения Земли) составляют около 20 км/с (Kholshchevnikov and Shor, 1995; 1996; Gladman et al., 2000).

13. Энергия столкновения

При столкновении космического тела с Землей его кинетическая энергия является главным разрушительным фактором. Поэтому оценка кинетической энергии является едва ли не первейшей задачей при обнаружении тела на орбите, приводящей к столкновению с Землей.

Кинетическая энергия E выражается формулой

$$E = \frac{m\tilde{v}^2}{2},$$

в которой m — масса тела, а \tilde{v} — его скорость относительно Земли с учетом притяжения Земли, рассчитанная по формуле (12.2).

Как было показано в предыдущем параграфе, скорость тела относительно Земли всегда может быть вычислена достаточно точно для ориентировочных расчетов. Сложнее обстоит дело с массой вновь открытого тела, которая оценивается со значительно большей погрешностью. За отсутствием других возможностей в подавляющем числе случаев массу на первых порах приходится оценивать по фотометрическому диаметру тела и его гипотетической плотности.

В §6 была получена формула (6.1), выражающая логарифм диаметра астероида в зависимости от его геометрического альbedo p_V в лучах V и абсолютной звездной величины H . Подставляя в эту формулу вместо 3.122 значение 3.1235 (именно такое значение было использовано в программе IRAS (Fowler and Chillemi, 1992) и переходя от логарифма диаметра к самой величине, находим выражение для диаметра астероида в километрах

$$D = 1329p_V^{-1/2}10^{-H/5} \quad (13.1)$$

Принимая, что тело имеет сферическую форму и однородно (плотность равна ρ), находим

$$m = \frac{\pi}{6}D^3\rho$$

или, подставляя сюда D из (13.1), получаем

$$m = \frac{\pi}{6}1329^310^{-3H/5}p_V^{-3/2}\rho \quad (13.2)$$

В этой формуле только величина H известна во всех случаях, хотя ее ошибка вполне может достигать половины звездной величины или быть даже большей. Альbedo p_V и плотность ρ известны далеко не всегда. Какие

Таблица 11. Рекомендуемые значения плотности и альбедо

Суперкласс [классы]	ρ (г/см ³)	p_V	$\rho p_V^{-3/2}$ (г/см ³)
C [C,G,B,F,P,T,D]	1.3	0.06	88
S [S,Q,A]	2.7	0.18	35
M	5.3	0.12	127
E [E,V,R]	2.7	0.40	11
АСЗ (стандарт)	2.6	0.154	43
Кометы (стандарт)	1.1	0.04	138

значения альбедо и плотности следует использовать в тех случаях, когда они не известны? В работе (Chisley et al., 2001) приведена таблица, в последних двух строках которой указаны рекомендуемые для использования значения плотностей и альбедо для АСЗ и комет в тех случаях, когда прямые определения этих величин отсутствуют (см. таблицу 11). В первых четырех строках этой таблицы указаны средние значения плотностей и средние значения альбедо для четырех суперклассов, охватывающих 14 таксономических классов Толена. Значения плотностей, характерные для первых трех суперклассов, найдены в работе (Standish, 2000) из возмущений в движении марсианских посадочных аппаратов (см. §7). В последней колонке таблицы приведены значения произведения $\rho p_V^{-3/2}$, входящего в формулу (13.2).

Последний столбец таблицы показывает, что малые значения альбедо для астероидов разных классов коррелируют с малыми плотностями. Благодаря этому величина $\rho p_V^{-3/2}$ не очень сильно разнится для различных классов. Рекомендуемые стандартные значения, найденные с учетом частоты встречаемости астероидов разных классов, приводят к величинам $\rho p_V^{-3/2}$, отличающимся не более чем в два — четыре раза от тех, которые соответствуют различным классам, благодаря чему ошибка массы оказывается не очень большой. Тем не менее, эта ошибка является определяющей при оценке величины энергии.

Величину кинетической энергии, приносимой падающим на Землю телом, принято выражать в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента. При этом

$$1 \text{ Мт} = 4.2 \cdot 10^{22} \text{ эрг} = 4.2 \cdot 10^{15} \text{ Дж.}$$

В таблицах 1 и 3 Приложения энергия столкновения подсчитана с использованием рекомендованных значений $\rho p_V^{-3/2}$, за исключением тех случаев, когда альбедо и таксономический класс астероида (а следовательно, и плот-

Таблица 12. Выделение энергии при различных катастрофах

Событие	Диаметр (км)	Энергия (Мт)	Частота падений в год
—	0.0044	0.01	1
Хиросима		0.015	
—	0.021	1.	$10^{-1} - 10^{-2}$
Тунгуска	0.060	$1.2 \cdot 10^1$	10^{-3}
—	0.210	$1.0 \cdot 10^3$	10^{-4}
Тамбор *		$1.0 \cdot 10^4$	
Глобальная катастрофа	1.5	$2.4 \cdot 10^5$	$10^{-6} - 10^{-7}$
К/Г катастрофа **	10	$1. \cdot 10^8$	10^{-8}

* Взрыв вулкана Тамбор в Индонезии в 1815 г., наиболее сильное извержение на памяти людей (Моисеев, 1988)

** Глобальная катастрофа на рубеже Мезозоя и Кайнозоя, вызвавшая гибель 90% всей биоты, в том числе динозавров.

ность) известны.

Для сравнения приведем таблицу 12, показывающую выделение энергии при падении на Землю тел различных диаметров и при некоторых природных и техногенных катастрофах. Сравнение этих данных с данными таблиц 1 и 3 Приложения показывает, что столкновение Земли с такими астероидами как (1620) Geographos, (1862) Apollo, (1981) Midas, (2102) Tantalus, (2201) Oljato, (3122) Florence, (4179) Toutatis и еще примерно с пятьюдесятью другими объектами, чьи данные приведены в таблицах, может вести к глобальной катастрофе. При этом для большинства комет энергия столкновения не подсчитана из-за отсутствия надежных оценок размеров их ядер. Тем не менее, данные для комет Галлея, C/1995 O1 (Hale-Bopp), C/1991 L3 (Levy) показывают, что столкновение с ними могут вызвать катастрофу, по масштабам превышающую ту, которая 65 млн лет тому назад уничтожила на Земле 90% всех видов живых организмов.

14. Определение и уточнение орбит из наблюдений. Оценка точности элементов орбиты

Для выделения потенциально опасных астероидов из общего числа АСЗ, для оценки вероятности столкновения их с Землей и предотвращения столкновений знание параметров движения и оценка их вероятных ошибок имеют первостепенное значение.

Как известно, движение тела относительно некоторой инерциальной системы координат полностью определяется заданием действующих на него

сил и начальными условиями. В качестве последних обычно выбирают координаты и компоненты скорости в некоторый момент или шесть элементов орбиты. Обратная задача заключается в том, чтобы по наблюдаемому движению небесного тела определить начальные условия движения, например, элементы орбиты в некоторый момент времени. Так как каждое позиционное наблюдение дает две сферические координаты (α и δ), то минимальное количество наблюдений, необходимых для определения шести элементов эллиптической орбиты, равно трем. Орбита, найденная по трем или небольшому числу наблюдений, называется предварительной. Для определения предварительной орбиты большей частью используются методы, основанные на работах Лагранжа, Гаусса и Лапласа. Как правило, при определении предварительной орбиты астероида или кометы учитывается только притяжение Солнца. Возмущающим влиянием больших планет на движение тела при этом пренебрегают.

Элементы предварительной орбиты имеет невысокую точность как из-за ошибок наблюдений, на основе которых она определена, так и из-за пренебрежения действующими на тело гравитационными возмущениями. Однако определение предварительной орбиты является необходимым этапом, поскольку она позволяет вычислить эфемериду тела для продолжения наблюдений в ближайшие дни и не потерять объект. Если в дальнейшем удастся получить дополнительные наблюдения или найти в каталоге наблюдения, принадлежащие тому же телу, то предварительная орбита подвергается исправлению, или уточнению, с учетом старых и новых наблюдений. При этом уже учитываются возмущения, вызываемые другими телами Солнечной системы.

Уточнение параметров движения чаще всего выполняется по методу наименьших квадратов (МНК).

Вновь наблюдаемые координаты тела как правило значительно отличаются от тех координат, которые вычисляются согласно теории движения с первоначально найденными параметрами (элементами орбиты тела). Процесс уточнения предварительной орбиты сводится к тому, чтобы найти такие поправки к исходной системе элементов, которые бы уменьшали рассогласование между наблюдаемыми положениями и вычисляемыми.

Пусть у нас имеются n наблюдаемых положений тела, которые мы обозначим как O_k (под O_k можно понимать наблюдаемое значение любой координаты). По теории движения с исходной системой элементов $E_i^0 (i = 1, \dots, 6)$ на моменты наблюдений t_k вычисляются положения C_k

$$F(t_k; E_1^0, \dots, E_6^0) = C_k.$$

Разности $O_k - C_k$ (их обычно называют «наблюдаемое минус вычисленное»), с одной стороны, зависят от неточности исходной системы элементов, с другой, от ошибок наблюдений, причем вклад первой составляющей на пер-

вых порах оказывается существенно больше второй. Функцию F в окрестности исходного значения $F(t; E_i^0)$ можно представить по степеням приращений элементов орбиты

$$F(t; E_1, \dots, E_6) = F(t; E_1^0, \dots, E_6^0) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial F(t; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_i} \right) \Delta E_i^0 + \dots \quad (14.1)$$

Предположим, что ошибки наблюдений малы и что E_1, \dots, E_6 есть та система элементов, которая позволяет более точно вычислить наблюдаемые значения O_k . Если допустить, что она мало отличается от исходной системы E_i^0 и что высшими степенями приращений ΔE_i^0 можно поэтому пренебречь, то формула (14.1) позволяет написать

$$\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial F(t_k; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_i} \right) \Delta E_i^0 = O_k - C_k. \quad (14.2)$$

Это так называемое условное уравнение относительно искомым поправок ΔE_i^0 .

Частные производные в левых частях условных уравнений могут считаться известными функциями, поскольку они всегда могут быть вычислены с большей или меньшей точностью.

Поскольку число наблюдений при уточнении орбиты больше числа уточняемых параметров, то система условных уравнений является избыточной. Если имеется хотя бы шесть линейно независимых условных уравнений с определителем, отличным от нуля, то из этих шести уравнений можно найти шесть поправок к шести элементам, в точности удовлетворяющих шести использованным уравнениям. Однако все остальные уравнения при подстановке в них найденных поправок, вообще говоря, удовлетворяться не будут, в силу того, что коэффициенты и правые части известны лишь приближенно, обременены ошибками. Система условных уравнений, таким образом, является несовместной. Речь может идти лишь о ее приближенном решении. В методе наименьших квадратов решение ищется на основе принципа Лежандра — минимизации суммы квадратов остаточных уклонений. Под остаточными уклонениями ε_k понимаются разности между левыми и правыми частями уравнений (14.2):

$$\varepsilon_k = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial F(t_k; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_i} \right) \Delta E_i^0 - (O_k - C_k).$$

Согласно принципу Лежандра искомые неизвестные поправки должны минимизировать величину S

$$S = \sum_{k=1}^n \left[\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial F(t_k; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_i} \right) \Delta E_i^0 - (O_k - C_k) \right]^2.$$

Необходимые условия минимума S как функции переменных ΔE_i^0 записываются в виде

$$\frac{\partial S}{\partial \Delta E_1^0} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial \Delta E_6^0} = 0. \quad (14.3)$$

Эти условия образуют систему шести линейных уравнений относительно шести неизвестных ΔE_i^0 ($i = 1, \dots, 6$). Например, первое из них записывается в виде

$$\sum_{k=1}^n 2 \left[\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial F(t_k; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_i} \right) \Delta E_i^0 - (O_k - C_k) \right] \frac{\partial F(t_k; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_1} = 0.$$

Остальные записываются аналогично.

Система шести уравнений (14.3) относительно неизвестных ΔE_i^0 называется нормальной. Использование матричного исчисления позволяет представить нормальную систему и ее решение в компактном виде. Составим матрицу коэффициентов условных уравнений

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(t_1; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_1} & \dots & \frac{\partial F(t_1; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_6} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F(t_n; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_1} & \dots & \frac{\partial F(t_n; E_1^0, \dots, E_6^0)}{\partial E_6} \end{pmatrix}$$

Обозначим также вектор-столбец с компонентами ΔE_i^0 как вектор \mathbf{X} , а вектор-столбец правых частей с компонентами $O_k - C_k$ как вектор \mathbf{L} . В таком случае система условных уравнений запишется в виде

$$\mathbf{B} \mathbf{X} = \mathbf{L}.$$

Нормальная система записывается в виде

$$\mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{X} = \mathbf{B}^T \mathbf{L},$$

где символ T означает транспонирование матрицы (замену строк столбцами и наоборот).

Матрицу нормальной системы $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ обозначим буквой \mathbf{Q} . Решение нормальной системы может быть найдено умножением обеих частей уравнения на матрицу

$$\mathbf{Q}^{-1} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1}$$

где символом «-1» обозначена матрица, обратная матрице \mathbf{Q} . Произведение обратной матрицы на саму матрицу дает единичную матрицу, вследствие чего решение записывается в виде

$$\mathbf{X} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L}. \quad (14.4)$$

Складывая найденные поправки ΔE_i^0 с исходной системой E_i^0 параметров, находят исправленную систему. Поскольку при образовании системы условных уравнений пренебрегали высшими степенями поправок, то исправленная система элементов не обеспечивает минимального значения суммы квадратов остающихся невязок, хотя обычно уменьшает ее. Для достижения минимума процедуру дифференциального исправления системы элементов приходится повторять до тех пор, пока поправки к элементам не станут достаточно малы. Найденное таким образом решение называют номинальным.

На практике используется большое число методов решения нормальной системы, в том числе и тот, который, согласно (14.4), основан на обращении матрицы \mathbf{Q} , хотя его следует избегать в случаях малости определителя матрицы. В теоретическом плане представление решения в виде (14.4) является наглядным и позволяет раскрыть ряд особенностей этого решения. К этому вопросу мы еще вернемся, но прежде рассмотрим вероятностный смысл решения системы условных уравнений методом МНК.

Поскольку, строго говоря, интересующие нас особенности имеют место только в случае распределения ошибок согласно нормальному закону (закону Гаусса), то остановимся сначала на этом законе. Нормальный закон распределения ошибок является математической абстракцией, которая более или менее хорошо отражает реальное распределение ошибок, имеющих место при выполнении большого числа измерений. Закон может быть представлен в виде

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-x_0)^2/(2\sigma^2)}, \quad (14.5)$$

(e — основание натуральных логарифмов).

В формуле (14.5) x представляет собой величину ошибки измерения, выраженную в некоторых единицах, x_0 — есть среднее значение ошибки с учетом ее знака (математическое ожидание величины ошибки), или центр распределения. Величина σ называется средним квадратичным отклонением, а ее квадрат — дисперсией распределения. Величины x_0 и σ являются параметрами закона. Значение y является ординатой точек кривой, описывающей распределение ошибок в зависимости от их величины.

На рис. 26 (ЩигOLEV, 1962) представлены кривые нормального закона распределения ошибок для случаев $\sigma = 0.5$, $\sigma = 1$, $\sigma = 2$. Во всех трех случаях принимается, что $x_0 = 0$ (несмещенное распределение ошибок).

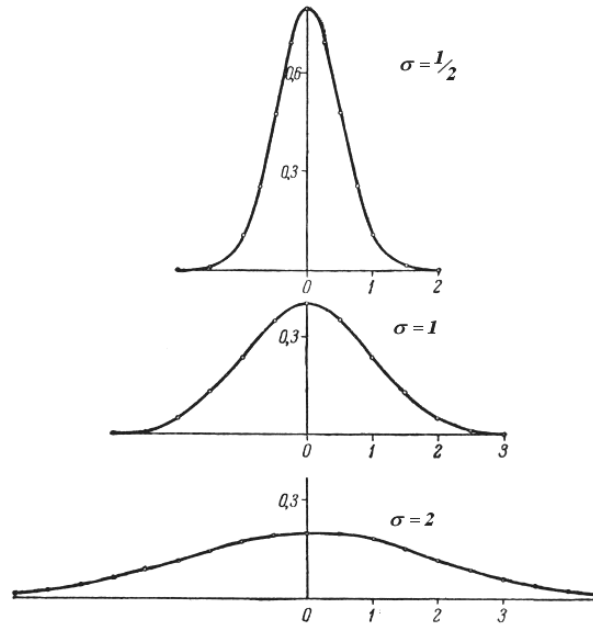


Рис. 26. Графики нормального закона распределения ошибок для случаев $\sigma = 0.5$, $\sigma = 1$, $\sigma = 2$.

Ордината точек кривой распределения ошибок носит название плотности вероятности (обозначается $p(x)$). Смысл плотности вероятности заключается в том, что площадь элементарного прямоугольника $p(x)\Delta x$ равна вероятности появления ошибки в интервале от x до $x + \Delta x$. Из формулы (14.5) следует симметрия кривой распределения относительно центра распределения x_0 (ошибки, противоположные по знаку, являются равновероятными). Кривая асимптотически приближается к оси абсцисс (вероятность появления достаточно большой по модулю ошибки практически равна нулю).

Если учесть, что площадь элементарного прямоугольника $p(x)\Delta x$ равна вероятности появления ошибки в интервале от x до $x + \Delta x$, то есть $P(x < X < x + \Delta) = p(x)\Delta x$, то вероятность получения ошибки в интервале от a до b ($a < b$) равна

$$P(a < X < b) = \int_a^b p(x)dx.$$

При a , стремящемся к минус бесконечности, и b , стремящемся к плюс бесконечности, путем замены переменной найдем

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/(2\sigma^2)} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2/2} dt. \quad (14.6)$$

Последний интеграл, как известно, равен единице (это находится в соответствии с тем, что вероятность появления произвольной по величине ошибки равна единице).

Для значений интеграла

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$$

вероятности появления ошибки в интервале от 0 до x при $\sigma = 1$ — составлены таблицы, из которых в частности следует, что при нормальном распределении вероятность появления ошибки, по модулю меньшей σ , равна 0.6826, ошибки, по модулю меньшей 2σ , — 0.9545, а ошибки, по модулю меньшей 3σ , — 0.9973. Ошибки, по модулю большие 3σ , часто считают маловероятными, и наблюдения с такой ошибкой отбраковывают.

На графиках нормального распределения ошибок хорошо видно, что, чем меньше дисперсия распределения σ^2 , тем больше вероятность появления малых по величине ошибок, поскольку кривая вытягивается вдоль оси ординат.

В математической статистике доказывается, что если распределение ошибок подчиняется нормальному закону (14.5), то решение системы условных уравнений по методу МНК не только минимизирует сумму квадратов остающихся невязок, но в то же самое время является и наиболее вероятным решением. Последнее утверждение нуждается в пояснении.

Рассмотрим наряду с имеющимся набором наблюдений, обремененных случайными ошибками, множество других наборов, имеющих другие случайные ошибки. Для каждого набора наблюдений может быть определена орбита, которая более или менее хорошо удовлетворяет рассматриваемому набору. Другими словами, остаточные отклонения для этих орбит находятся в пределах допустимых случайных ошибок наблюдений. Реальная орбита тела остается для нас неизвестной, поскольку все наблюдения в большей или меньшей степени ошибочны. Можно лишь утверждать, что она является одной из множества возможных орбит. Однако, если ошибки наблюдений распределены по нормальному закону, то решение МНК является наиболее вероятным из всех возможных решений, совместимых с имеющимися наблюдениями.

Элементы орбит, определяемые на основе наборов наблюдений, обремененных случайными ошибками, также являются функциями ошибок. Элементы номинальной орбиты, найденной по методу МНК, являются наиболее вероятными значениями этих функций, и их ошибки также распределены по нормальному закону, хотя параметры закона (центр распределения и диспе-

рсия) для каждого элемента свои. Центр распределения, очевидно, определяется значением элемента, найденным по методу МНК, а дисперсии элементов определяются диагональными элементами матрицы \mathbf{Q}^{-1} , обратной матрицы нормальной системы. Иначе говоря, если обозначить среднюю квадратическую ошибку элемента E_i , найденного по МНК, как σ_i , то

$$\sigma_i = \sigma \sqrt{Q_{ii}^{-1}},$$

где σ — средняя квадратическая величина остаточных уклонений

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n \varepsilon_k^2}{n - m}},$$

n — число условных уравнений, m — число определяемых неизвестных, в нашем случае 6, Q_{ii}^{-1} — i -тый диагональный элемент обратной матрицы нормальной системы.

Для нормального распределения ошибок элементов справедливы все отмеченные выше особенности нормального распределения, в частности то, что вероятность появления ошибки, превышающей утроенное значение средней квадратической ошибки элемента, меньше 0.003.

Когда мы говорим об ошибках элементов орбиты, то понимаем при этом возможные отличия элементов от тех значений, которые элементы имеют в номинальном решении. Таким образом, область возможных значений для каждого элемента является $E_i \pm 3\sigma_i$. Каждую возможную орбиту можно представить как точку шестимерного пространства, по осям которого откладываются значения элементов орбит. В начале шестимерной системы координат находится точка, соответствующая номинальному решению. Рассмотрим малую окрестность некоторой точки этого пространства. Вероятность попадания орбиты в эту окрестность зависит от одновременного попадания шести элементов орбиты в соответствующие элементарные интервалы ΔE_i . Мы уже видели, что при нормальном распределении ошибок эти вероятности определяются формулами типа (14.5)

$$p(x_i) dx_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-(x_i - x_{i0})^2 / (2\sigma_i^2)} dx_i,$$

где под x_i следует понимать элемент E_i , $p(x_i)$ — плотность вероятности распределения ошибок соответствующего элемента, σ_i — корень квадратный из дисперсии ошибок (средняя квадратическая ошибка элемента).

Мы предположим ради простоты изложения, что случайные ошибки элементов E_i и E_j ($i, j = 1, \dots, 6$) попарно независимы, т.е. вероятность попадания ошибки элемента E_i в некоторый интервал не зависит от ошибки элемента E_j . В этом предположении ошибки всех элементов являются независимыми в совокупности. Плотность вероятности одновременного попадания шести элементов в достаточно малую окрестность точки (E_1, \dots, E_6) в

этом случае выражается как произведение плотностей вероятностей распределения ошибок отдельных элементов

$$p(E_1, \dots, E_6) = p_1(E_1) p_2(E_2) \dots p_6(E_6).$$

Каждый сомножитель в правой части последней формулы определяется формулой типа (14.5). Из этого вытекает, что плотность вероятности в точке r в случае шестимерного нормального распределения при сделанном предположении определяется формулой

$$p(r) = \frac{1}{\sigma_1 \dots \sigma_6 \sqrt{(2\pi)^6}} e^{-\sum \frac{(x_i - x_{i0})^2}{2\sigma_i^2}} \quad (14.7)$$

Указанная плотность вероятности остается неизменной во всех точках пространства, где

$$\sum_{i=1}^6 \frac{(x_i - x_{i0})^2}{2\sigma_i^2} = \text{const.}$$

При каждом положительном значении постоянной это выражение представляет собой уравнение эллипсоида в осях, совпадающих по направлению с главными осями эллипсоида и имеющих начало в точке x_{i0} шестимерного пространства (в нашем случае $x_{i0} = 0$). Если представить, что в шестимерном пространстве элементов по осям прямоугольной системы координат с началом в точке, отвечающей номинальной орбите, отложены величины σ_i и представить себе шестимерный эллипсоид с полуосями σ_i , то плотность вероятности на таком эллипсоиде будет всюду одинаковой. То же самое будет справедливо и для любого другого подобного и подобным образом расположенного эллипсоида. Такие эллипсоиды называются эллипсоидами равных плотностей вероятностей.

По аналогии с одномерным случаем можно заключить, что вероятность попадания точки внутрь некоторого эллипсоида равна интегралу

$$P(r \in R) = \int_R p(r) dr,$$

где интегрирование распространяется на все пространство, ограниченное эллипсоидом. Если полуоси эллипсоида неограниченно увеличиваются, то интеграл по всему пространству равен единице. Если представить эллипсоид с полуосями, равными $3\sigma_i$, то вероятность попадания точки в область пространства, ограниченную этим эллипсоидом, близка к единице. Такой эллипсоид мы будем называть доверительным.

Выше мы предположили, что ошибки элементов независимы. На самом деле вероятность того, что одна из них примет значение в произвольном

интервале, зависит от значений других величин. Такие величины называются корреляционно связанными, или находящимися в корреляции. Отражением этих связей между ошибками отдельных элементов, найденных по методу МНК, являются величины недиагональных элементов обратной матрицы \mathbf{Q}^{-1} , которую вследствие этого называют корреляционной матрицей решения или матрицей ковариаций. Корреляционные связи могут проявляться по-разному. Например, большие по абсолютной величине ошибки одного элемента могут сопровождаться большими же по абсолютной величине, но противоположными по знаку ошибками другого элемента. Примером двух элементов, находящихся в жесткой корреляционной зависимости, являются долгота узла и угловое расстояние перигелия от узла при малом наклоне орбиты. Ошибки этих величин близки по величине и противоположны по знаку.

Сделанное выше допущение о независимости случайных ошибок элементов эквивалентно допущению, что все недиагональные элементы матрицы ковариаций равны нулю. В том случае, если это допущение неверно, плотность вероятности многомерного нормального распределения будет иметь более сложный вид по сравнению с (14.7). В показателе экспоненты будет присутствовать сумма не только квадратов, но и смешанных членов вида $(x_i - x_{i0})(x_j - x_{j0})$ с коэффициентами, зависящими от недиагональных элементов матрицы ковариаций (коэффициентов корреляции). Но и в этом случае приравнивание суммы в показателе экспоненты положительной постоянной дает уравнение эллипсоида равной плотности вероятности, отнесенное к некоторой другой системе координат, которая путем поворота может быть ориентирована по главным осям эллипсоида.

Корреляционные матрицы, определяющие погрешности элементов и корреляционные связи между ними, находят важное применение при определении погрешностей различных функций этих элементов. К этому вопросу мы еще вернемся в следующем параграфе. Сейчас лишь отметим, что эти матрицы для всех АСЗ в случае необходимости можно найти на FTP-сервере ИПА РАН: <ftp://www.quasar.ipa.nw.ru> (см. также <http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo?neaelements:0;main>).

Более простым и наглядным, хотя и не вполне надежным, способом описания точности элементов является указание числа использованных наблюдений при уточнении орбиты, длины интервала, на котором распределены наблюдения, числа оппозиций в данном интервале и величины средней квадратичной ошибки. Все эти величины приводятся в таблице 1 Приложения для каждого потенциально опасного астероида. Величина σ выражена в секундах дуги. Как правило, увеличение числа использованных наблюдений ведет к повышению надежности элементов и уменьшению средней квадратичной ошибки. Длина интервала особенно важна для надежного определения среднего движения или большой полуоси орбиты. Число оппозиций обыч-

но является характеристикой того, какая часть гелиоцентрической орбиты малой планеты покрыта наблюдениями. Если наблюдения сосредоточены на небольшой части орбиты, как это бывает в случае открытия нового объекта, плохо определяются практически все элементы орбиты. Если период обращения тела не кратен году, то каждая следующая оппозиция случается в новой точке орбиты тела и наблюдения в окрестности разных оппозиций позволяют покрыть наблюдениями практически всю орбиту. Для АСЗ с небольшим блеском наблюдения чаще всего выполняются в период их сближения с Землей, т.е. на небольшой гелиоцентрической дуге, вследствие чего элементы орбит определяются со значительными погрешностями.

15. Поиск потенциально опасных сближений астероидов с Землей и оценка вероятности столкновений

После того как номинальная орбита астероида определена, появляется возможность предвычислить его движение в предстоящий период времени и определить, угрожает ли Земле столкновение с ним в обозримом будущем. В зависимости от точности найденной орбиты, величины $MOID$ и других обстоятельств, такие расчеты проводятся на интервалах от нескольких лет и до ста лет включительно. Прогнозирование движения выполняется методом численного интегрирования уравнений движения, в которых учитываются члены, обусловленные притяжением больших планет и наиболее массивных малых планет. В ходе численного интегрирования фиксируются моменты тесных сближений с Землей и другими большими планетами, которые могут заметным образом трансформировать орбиту тела и тем самым оказать влияние на ее последующие сближения с Землей.

Поскольку столкновения достаточно крупных тел с Землей весьма редкие события, то при прогнозировании движения тела по номинальной орбите столкновения с Землей как правило не обнаруживаются. Нужно, однако, иметь в виду, что номинальная орбита является лишь одной из бесчисленного количества других возможных орбит, элементы которых более или менее близки к элементам номинальной орбиты. И хотя элементы орбит соответствующих тел приводят к несколько большей сумме квадратов остающихся невязок, тем не менее сами невязки остаются в пределах возможных случайных ошибок наблюдений. Таким образом, в пространстве элементов орбит номинальная орбита окружена областью возможных орбит. Эта область может быть квалифицирована как область неопределенности начальных условий движения. Фактическая орбита тела, которая нам не известна, находится где-то внутри области неопределенности.

Аналогичное представление об области неопределенности начальных условий движения справедливо и в том случае, если рассматривать точки не в пространстве элементов орбит, а в пространстве начальных значений пря-

моугольных координат и скоростей тел, что имеет несколько большую наглядность.

Вообще говоря, любая точка внутри области неопределенности может представлять некоторую орбиту, совместимую с имеющимися наблюдениями. Но ради удобства мы представим себе область неопределенности заполненной изолированными точками, причем так, что плотность их пространственного распределения тем выше, чем больше вероятность существования орбиты в малой окрестности данной точки. При этом условии номинальное решение оказывается расположенным в центре наиболее плотного распределения точек. По мере удаления от центра плотность распределения постепенно уменьшается, причем по-разному в различных направлениях. Если представить, что в шестимерном пространстве элементов по осям прямоугольной системы координат с началом в точке, отвечающей номинальной орбите, отложены величины $\sigma_i = \sigma \sqrt{Q_{ii}^{-1}}$, равные среднеквадратическим погрешностям элемента с номером i и представить себе эллипсоид с полуосями σ_i , то, как было показано в §14, плотность распределения точек на таком эллипсоиде будет всюду одинаковой. То же самое будет справедливо и для любого другого подобного и подобным образом расположенного эллипсоида. Эллипсоид с полуосями, равными $3\sigma_i$, ограничивает область, в которой сосредоточены практически все совместимые с наблюдениями начальные условия. Мы будем называть такой эллипсоид доверительным, а ограниченную им область начальных условий — доверительной областью.

Как отмечалось ранее, по мере увеличения числа использованных наблюдений и расширения покрываемого ими временного интервала ошибки определения элементов вообще говоря уменьшаются, а вместе с тем сокращаются и полуоси доверительного эллипсоида. Его центр, соответствующий новому номинальному решению, при этом также несколько смещается.

Тело на возможной орбите мы будем называть виртуальным (возможным) астероидом (Milani et al., 2000). Если внутри доверительного эллипсоида случайным образом выбрать большое число виртуальных астероидов и следить за их движением на некотором интервале, то можно наблюдать, как с течением времени изменяются форма и размеры области пространства, в которой в данный момент заключены виртуальные астероиды. Во всех случаях, с которыми приходится иметь дело на практике, область, первоначально занятая доверительным эллипсоидом, постепенно расширяется и вытягивается вдоль номинальной орбиты тела. Причиной этого являются небольшие отличия в элементах виртуальных астероидов, причем отличия в среднем движении вызывают пропорциональные времени расхождения в средней аномалии, значение которой определяет положение тела на орбите. В результате граница области, занятой виртуальными астероидами, постепенно вытягивается в трубку более или менее постоянной ширины, окружающую номинальную орбиту. С течением времени длина трубки может достичь тысяч и миллионов

километров и даже превзойти длину орбиты тела.

Возмущающее влияние больших планет на виртуальные астероиды, растянувшиеся вдоль трубки, оказывается весьма различным. Особенно большие искажения области пространства, занятой виртуальными астероидами, происходит при тесных сближениях с Землей или другими планетами. Орбиты с близкими начальными условиями движения по простетвию большого интервала времени могут оказаться весьма далекими друг от друга или напротив того скрещивающимися друг с другом, что может быть квалифицировано как наложение области возможных движений самой на себя. Во всех таких случаях принято говорить о нарушении линейности задачи.

Решение задачи об оценке вероятности встречи астероида с Землей мы рассмотрим, следуя в целом линии, намеченной в работах (Milani et al., 2000; Milani et al., 2002). На первом этапе будем предполагать, что задача имеет линейный характер, отложив на потом более сложные случаи. Фактически это равносильно предположению, что область пространства, занятая виртуальными астероидами в окрестности сближения номинальной орбиты с Землей, представляет собой эллипсоид, хотя его размеры и форма (вытянутость) отличаются от размера и формы доверительного эллипсоида в начальный момент времени.

При оценивании риска столкновения естественных космических тел друг с другом или искусственных космических аппаратов с естественными телами важнейшую роль играет понятие плоскости цели. Плоскость цели — это плоскость, проходящая через центр планеты-мишени перпендикулярно к невозмущенному вектору скорости тела-снаряда относительно планеты-мишени \hat{v} (§12). Когда астероид имеет тесное сближение с большой планетой, его гелиоцентрическая орбита начинает постепенно меняться под действием тяготения планеты. Внутри сферы действия планеты траектория астероида относительно планеты очень близка к гиперболе (рис. 27) (напомним, что сферой действия планеты называется область пространства, в которой отношение возмущающего ускорения, сообщаемого телу планетой, к ускорению, сообщаемому телу Солнцем, превосходит отношение возмущающего ускорения, сообщаемого телу Солнцем, к ускорению, сообщаемому телу планетой; приближенное значение радиуса сферы действия Земли равно 0.0062 а.е., или 930000 км).

Относительная скорость астероида \hat{v} на входе в сферу действия равна разности гелиоцентрических скоростей астероида и Земли. По направлению она близка к асимптоте гиперболы, описываемой телом в сфере действия планеты. Обогнув Землю, на выходе из сферы действия астероид имеет ту же самую по величине относительную скорость \hat{v} , но ее направление изменяется на угол γ .

Из определения плоскости цели следует, что на рис. 27 штриховая прямая, проведенная перпендикулярно асимптоте гиперболы через центр Земли,

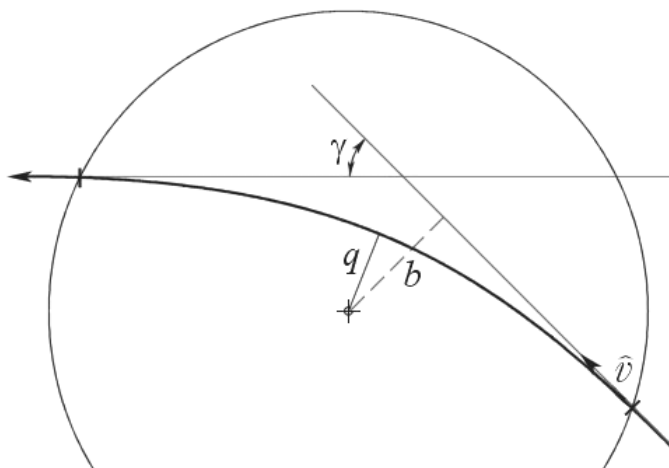


Рис. 27. Траектория движения астероида относительно Земли в пределах ее сферы действия

есть след от пересечения плоскости цели с плоскостью относительной орбиты тела. Отрезок этой прямой от центра Земли до асимптоты обозначен как b . Его называют прицельным расстоянием. Как видно на рисунке, прицельное расстояние по величине превышает минимальное расстояние гиперболы от центра Земли q . Эти две величины связаны соотношением

$$b^2 = q^2 \left(1 + \frac{v_\infty^2}{\hat{v}^2} \right), \quad (15.1)$$

где

$$v_\infty = \sqrt{\frac{2GM_\oplus}{r_\oplus}},$$

есть параболическая скорость относительно Земли.

В этой формуле G — гравитационная постоянная, M_\oplus — масса Земли, а r_\oplus — ее экваториальный радиус. Если в формулу (15.1) подставить q , равное r_\oplus , то b будет равно прицельному расстоянию, при котором траектория астероида коснется поверхности Земли. Соответствующее значение прицельного расстояния называется радиусом захвата. При меньших значениях прицельного расстояния астероид обязательно столкнется с Землей. В зависимости от соотношения v_∞ и \hat{v} радиус захвата может существенно превышать геометрический радиус Земли. При решении вопроса о реальности столкновения следует использовать не радиус Земли, а ее радиус захвата.

Рассмотрение процесса сближения космических тел с Землей облегчается при использовании специально выбранной системы координат. Столкновения могут иметь место только в малой окрестности минимального расстояния

между орбитами. В этой окрестности орбиты Земли и тела могут рассматриваться как отрезки двух прямых, скрещивающихся в пространстве (в частном случае — пересекающихся). Кратчайшим расстоянием между ними является отрезок прямой, перпендикулярный к обоим скрещивающимся прямым. При выборе системы координат, связанной с плоскостью цели, ее начало помещают в центр Земли, которая находится у одного конца отрезка, являющегося кратчайшим расстоянием между орбитами. Плоскость цели проводят через центр Земли, перпендикулярно к вектору невозмущенной геоцентрической скорости астероида \hat{v} , т.е. той скорости, которую тело имеет к моменту входа в сферу действия Земли. Нетрудно видеть, что отрезок кратчайшего расстояния между двумя орбитами лежит в плоскости цели (рис. 28). В самом деле, он перпендикулярен орбитальной скорости Земли и гелиоцентрической скорости астероида, и следовательно, их разность — скорость астероида относительно Земли \hat{v} — также перпендикулярна этому отрезку, из чего вытекает, что он лежит в плоскости цели.

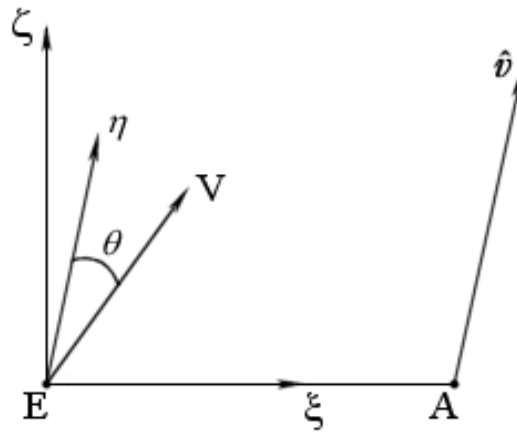


Рис. 28. Система координат, связанная с плоскостью цели.

На рис. 28 отрезок EA — кратчайшее расстояние между двумя орбитами, \mathbf{V} — гелиоцентрическая скорость Земли, \hat{v} — скорость астероида относительно Земли на бесконечности (на границе сферы действия). Ось η рассматриваемой системы координат направлена параллельно \hat{v} , ось ξ вдоль кратчайшего расстояния между орбитами, ось ζ перпендикулярна осям ξ и η и направлена так, что вместе с ними образует правую систему координат. Угол θ на рисунке — есть угол в плоскости η, ζ между направлением скорости Земли и осью η .

В начальный момент, от которого идет отсчет времени, орбита пересекает плоскость цели в точке A, причем координата ζ этой точки равна нулю. Расстояние EA, или координата ξ точки A, равна прицельному расстоянию b — наименьшему возможному расстоянию невозмущенной орбиты от цен-

тра Земли. Но не все виртуальные астероиды, которые движутся вдоль номинальной орбиты, пройдут на минимальном расстоянии от Земли. Только один из них пересекает плоскость цели в момент, когда Земля находится у одного конца кратчайшего отрезка между орбитами. Другие виртуальные астероиды, движущиеся вдоль номинальной орбиты, пересекают плоскость цели раньше или позже, чем это нужно для достижения минимального расстояния между телами, и соответствующие точки пересечения имеют в плоскости цели различные значения координаты ζ . В самом деле, в неподвижной системе координат с осями, параллельными осям ξ, η, ζ за время Δt координата ζ Земли изменяется на величину

$$\Delta\zeta = |\mathbf{V}| \sin\theta \Delta t, \quad (15.2)$$

где θ — угол между направлением гелиоцентрической скорости Земли и осью η .

В системе координат ξ, η, ζ координаты Земли не меняются, оставаясь все время нулевыми, но виртуальный астероид, движущийся вдоль номинальной орбиты и пересекающий плоскость цели с опозданием Δt имеет в этот момент координату ζ , равную величине, стоящей в правой части (15.2).

Таким образом, цепочка виртуальных астероидов, вытянувшихся вдоль номинальной орбиты, проектируется на плоскость цели в прямую, параллельную оси ζ , причем виртуальный астероид, соответствующий центру доверительного эллипсоида в момент t_0 , пересекает плоскость цели в точке, расположенной, вообще говоря, выше или ниже оси ξ . Область вокруг этой точки на плоскости ξ, ζ является отображением области возможных начальных условий движения на плоскость цели. Другими словами, виртуальные астероиды, соответствующие всем возможным начальным условиям движения, пересекают плоскость цели в точках, окружающих точку пересечения номинального решения с этой плоскостью. Поскольку мы с самого начала предположили линейный характер задачи, можно утверждать, что область начальных значений, ограниченная в момент t_0 доверительным эллипсоидом, отобразится на плоскость ξ, ζ в часть плоскости, ограниченную эллипсом с центром в точке, соответствующей центру доверительного эллипсоида. Задача сводится к тому, чтобы найти координаты центра эллипса на плоскости ξ, ζ и его полуоси и оценить расположение эллипса относительно изображения Земли.

В линейном приближении эта задача решается достаточно просто. В общем виде ход решения задачи можно описать следующим образом.

Координаты точки ξ, ζ на плоскости цели являются функциями F_1 и F_2 элементов орбиты, что в векторном виде можно записать как

$$\mathbf{L} = \mathbf{F}(\mathbf{E}),$$

где \mathbf{L} — двумерный вектор с компонентами ξ , ζ , а \mathbf{E} — вектор элементов орбиты.

В рамках линейного приближения матрица ковариации \mathbf{D} вектора \mathbf{L} связана с матрицей ковариации вектора \mathbf{E} известным соотношением

$$\mathbf{D} = \sigma^2 \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{E}} \right) \mathbf{Q}^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{E}} \right)^T, \quad (15.3)$$

где $(\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{E})$ — частные производные от \mathbf{F} по элементам \mathbf{E} . Символ T означает операцию транспонирования матрицы. Величины σ и \mathbf{Q}^{-1} известны, поскольку они являются соответственно средней квадратической величиной остаточных уклонений, или, иначе говоря, средней квадратической погрешностью наблюдений, использованных при определении орбиты тела, и обратной матрицей нормальной системы уравнений (см. §14).

Компоненты вектора \mathbf{L} и частные производные $(\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{E})$ в момент t находятся численным интегрированием уравнений движения и уравнений, определяющих эти производные (так называемые уравнения в вариациях) при заданных начальных условиях движения. Таким образом, на момент сближения астероида, соответствующего номинальному решению, с Землей оказываются известными координаты центра эллипса в плоскости цели и его полуоси, определяемые как

$$a_i = \sqrt{D_{ii}},$$

где D_{ii} — диагональные элементы матрицы ковариаций (15.3).

Возможны следующие три случая взаимного расположения Земли и эллипса на плоскости цели:

- эллипс расположен на некотором расстоянии от окружности с радиусом, равным радиусу захвата Земли (рис. 29 а)), что практически исключает возможность столкновения астероида с Землей.
- кружок с радиусом, равным радиусу захвата, находится внутри эллипса (рис. 29 б)). Вероятность столкновения может быть рассчитана, исходя из отношения площади кружка к площади, ограниченной эллипсом. Для повышения точности прогноза можно учесть неодинаковую вероятность попадания виртуальных астероидов в различные точки области, ограниченной эллипсом.
- площадь, ограниченная эллипсом, частично покрывает область захвата Земли (рис. 29 в)). Этот случай практически не отличается от предыдущего. Вероятность столкновения рассчитывается с учетом отношения перекрывающейся области ко всей площади, ограниченной эллипсом.

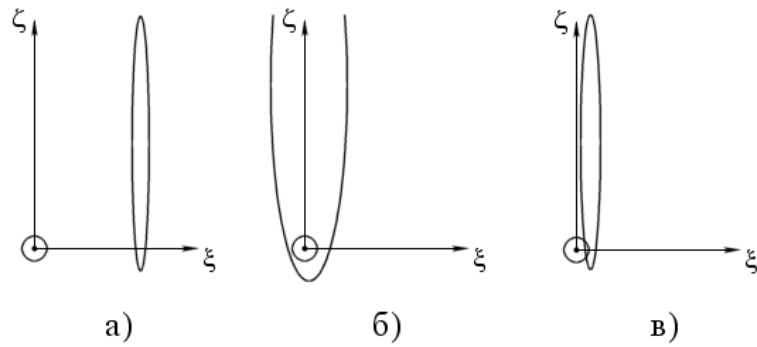


Рис. 29. Возможные взаимные расположения эллипсов ошибок и Земли в плоскости цели

Более подробно на подсчете вероятности столкновения мы останавливаться не будем, так как во всех случаях, когда возникает реальная угроза столкновения, следует предпринять дополнительные исследования, учитывающие возможный нелинейный характер задачи.

Нелинейный характер задачи может иметь место по многим причинам. Доверительный эллипсоид уже в момент t_0 может недостаточно хорошо описывать область возможных начальных условий, поскольку само распределение ошибок наблюдений может не подчиняться закону Гаусса. Чем дальше от эпохи t_0 , тем больше нарастает «нелинейность» и применение формулы (15.3) становится незаконным. Проекция доверительного эллипсоида на плоскость цели в момент t сближения с Землей, отдаленный от t_0 на десятилетия, вытягивается в очень узкую область, которая к тому же искривляется в соответствии с кривизной земной орбиты. По всем этим причинам линейный анализ задачи становится неадекватным, и требуется применение более тонких методов анализа. К настоящему времени предложено два таких метода: метод Монте-Карло и метод линии вариации.

Метод Монте-Карло, или метод статистических испытаний, в применении к данной задаче означает прямое использование вероятностной интерпретации метода наименьших квадратов (МНК). Поскольку процесс уточнения орбиты по МНК доставляет наиболее вероятное решение, окруженное областью других возможных решений, то можно выбрать в этой области случайным образом большое число виртуальных астероидов и следить со всей возможной точностью за их движением в течение некоторого времени, пока они не столкнутся с Землей или не пролетят мимо нее. Тогда отношение числа столкнувшихся виртуальных астероидов к их общему количеству можно рассматривать как вероятность столкновения с Землей интересующего нас астероида, орбита которого доподлинно не известна. Этот метод замечателен своей простотой, универсальной применимостью и возможно-

стью правильного учета нелинейности задачи. К сожалению, метод является чрезвычайно трудоемким. Действительно, чем менее вероятное событие требуется оценить, тем большее количество начальных условий движения следует испытать. Пусть, например, при испытании 10^6 случайно выбранных начальных условий в пяти случаях было зафиксировано столкновение с Землей. Тогда можно утверждать, что вероятность столкновения близка к 0.000005. Но если проведена только тысяча испытаний, которые не выявили ни одного попадания, тогда можно лишь сказать, что вероятность столкновения, по-видимому, меньше 0.001. Поскольку на практике приходится искать опасные сближения с Землей на интервалах в несколько десятков лет и вероятности столкновений при этом имеют, как правило, порядок 10^{-4} и менее, то требуется несколько дней работы компьютера для получения надежного результата в отношении только одного астероида (Milani et al., 2000).

В то время как метод Монте-Карло основывается на выборе случайных точек во всем шестимерном пространстве возможных начальных условий и их последующем испытании, имеется очевидная возможность выбора точек в каком-нибудь подпространстве, относительно которого можно предполагать, что берущие в нем начало решения достаточно хорошо отражают поведение решений во всей доверительной области. В качестве такого подпространства можно, например, использовать линию вариации, которая является ничем иным, как линией, вдоль которой номинальное решение определяется с наибольшей погрешностью. В доверительном эллипсоиде линия вариации совпадает с направлением наиболее вытянутой оси, как правило большей оси, соответствующей среднему движению астероида, или, что то же самое, большой полуоси его орбиты. В методе линии вариации виртуальные астероиды берутся со значениями пяти элементов, соответствующими номинальному решению, в то время как шестой элемент (среднее движение или большая полуось) варьируется в пределах $\pm 3\sigma$ с постоянным или переменным шагом, в последнем случае, чтобы учесть гауссово распределение вероятности вдоль линии вариации. Как и в методе Монте-Карло движение виртуальных астероидов прослеживается на всем исследуемом интервале, в особенности их сближения с Землей и пересечения их орбит с плоскостью цели в окрестности этих сближений. Поскольку при этом точки пересечения виртуальных астероидов с плоскостью цели представляют наборы, зависящие только от одного параметра, то достаточно просто (путем интерполяции или методом Ньютона нахождения корней функции) определяются значения среднего движения (большой полуоси), при котором реализуется максимальное сближение виртуального астероида с Землей.

Хотя этот метод является эффективным средством анализа сближений, нельзя быть уверенным, что при этом будут найдены все возможные столкновения, например, те, которые соответствуют точкам доверительного эллипсоида, расположенными далеко от линии вариации. Соответствующие им точки

на плоскости цели, если имеет место сильно выраженная нелинейность задачи, могут оказаться на значительном удалении от точек, отвечающих линии вариации, и часть из них может при этом вести к столкновениям. Метод Монте-Карло должен в принципе обнаруживать подобные случаи. Поэтому оба метода должны дополнять друг друга и использоваться для взаимного контроля.

Обратимся теперь к рассмотрению особенностей, которые связаны с нелинейными эффектами. Если все возможные сближения виртуальных астероидов с Землей на исследуемом интервале упорядочить по времени, то можно видеть, что они группируются около нескольких эпох, когда Земля оказывается вблизи узла номинальной орбиты астероида на эклиптике. По аналогии с метеороидами, встречающимися с Землей, такие наборы виртуальных астероидов можно назвать потоками. Очень часто поток можно подразделить на отдельные струи, охватывающие подмножества виртуальных астероидов на динамически различных путях. Например, один поток может включать несколько струй, в которых виртуальные астероиды совершили за время, истекшее с момента t_0 , различное число оборотов вокруг Солнца. Аналогичное подразделение потока на струи может возникнуть в результате его тесного сближения с Землей, когда часть виртуальных астероидов под влиянием возмущений со стороны последней оказываются на орбитах, имеющих те или иные соизмеримости с Землей. В итоге, спустя определенное целое число лет, Земля может встретиться вблизи узла номинальной орбиты астероида уже с несколькими различными струями виртуальных астероидов. На плоскости цели отдельные струи обнаруживаются в виде чрезвычайно вытянутых пепочек виртуальных астероидов, располагающихся внутри доверительной области отдельной струи, ширина которой во много раз меньше ее длины (рис. 30 а), б).

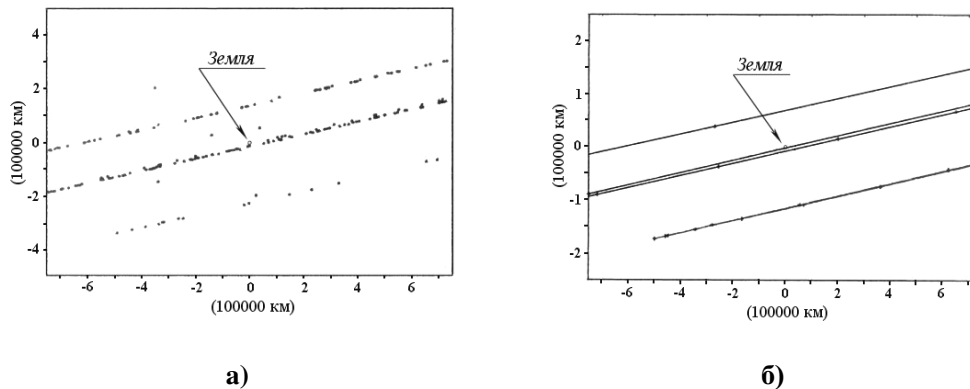


Рис. 30. Поток виртуальных астероидов в январе 2046г., соответствующих орбите астероида 1998 OX₄ (Milani et al., 2002)

На рис. 30 показан поток виртуальных астероидов в январе 2046г., соответствующих орбите астероида 1998 ОХ₄. Поток подразделяется на три струи. Отмечены точки пересечения отдельных виртуальных астероидов с плоскостью цели. Земля представлена кружком соответствующего масштаба в центре рисунка. Рис.30 а) построен по данным метода Монте-Карло, рис. 30 б) — по данным метода линии вариации. Одна из струй пересекает Землю, ввиду чего возможно столкновение. Отметим, что оси координат на рисунке не совпадают с осями ξ , ζ , вследствие чего направление струй не параллельно вертикальной оси.

Некоторые струи могут обнаруживать поведение, отличное от только что описанного. Например, при изменении среднего движения вдоль линии вариации точки пересечения соответствующих виртуальных астероидов с плоскостью цели сначала приближаются к линии минимального расстояния между Землей и астероидом, но затем движение прекращается и сменяется на обратное. Такое поведение может быть названо прерванным возвращением. Оно возникает в результате предшествующих тесных сближений с Землей. Примером прерванного возвращения может служить струя, расположенная на рис. 30 а, б внизу. Как показано на рис. 30 б), последовательные точки сначала смещаются справа налево, а затем слева направо. В особых случаях может оказаться, что точка возврата располагается внутри Земли. Случаи прерванного возвращения требуют особой трактовки.

Остановимся в заключение на некоторых особенностях, связанных с подсчетом вероятности столкновения в случае нелинейности задачи. Как мы видели, для таких случаев характерно вытягивание области пересечения виртуальных астероидов с плоскостью цели в очень узкую полосу, длина которой в тысячи раз превосходит ширину. Точка, соответствующая номинальному решению, может отстоять на очень большое расстояние от Земли. При этом из-за нелинейности точность определения минимального расстояния полосы от Земли оказывается невысокой, что недопустимо, если само расстояние составляет, согласно вычислениям, всего лишь несколько земных радиусов. В таких случаях рекомендуется использовать итеративную процедуру, которая сводится к поиску поправок к номинальному решению, приводящих к более тесному сближению соответствующего виртуального астероида с Землей (Milani et al. 2000). Для этого, например, можно, используя номинальное решение в качестве исходного, найти значение среднего движения, приводящее к минимальному расстоянию астероида от Земли, а затем переопределить остальные элементы по МНК при найденном фиксированном значении среднего движения. Так как элементы орбиты, положение и скорость астероида при сближении с Землей при этом несколько изменяются, то следует определить новое положение плоскости цели и новое минимальное расстояние от центра Земли. Процесс повторяют до тех пор, пока минимальное расстояние не перестанет изменяться.

Если оказалось, что минимально возможное расстояние меньше радиуса захвата Земли, то столкновение в принципе возможно и надо оценить его вероятность. При условии, что ширина полосы много меньше диаметра Земли, легко написать формулу для оценки вероятности столкновения. В самом деле, полоса, где располагаются виртуальные астероиды, вырезает в области захвата Земли хорду максимальной длины $2R_0$ (R_0 — радиус захвата Земли). Пусть длина всей полосы, соответствующая изменению среднего движения в пределах $\pm 3\sigma$, составляет Λ км. Плотность вероятности распределения виртуальных астероидов вдоль этой полосы, которую мы будем рассматривать как одномерную, зависит от двух параметров: центра распределения и величины среднего квадратичного отклонения среднего движения от его номинального значения. Центр распределения в нашем случае совпадает со значением среднего движения в номинальном решении. Величина σ_n также известна. Плотность распределения виртуальных астероидов вдоль полосы описывается кривой Гаусса

$$p(z) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-(z-z_0)^2/(2\sigma_n^2)},$$

где $p(z)$ — плотность вероятности при данном значении z . Величина $p(z)dz$ есть ничто иное, как вероятность попадания виртуального астероида в интервал $z - (z + dz)$. Чтобы воспользоваться этой формулой, надо оценить величину $p(z)$ при значении z , которое соответствует пересечению полосы с Землей, и величину dz . Отношение l/Λ , где l — длина хорды, можно рассматривать как малое по величине приращение dz переменной z в пределах области захвата. Значение переменной z , соответствующее пересечению полосы с Землей, — это просто расстояние от центра полосы до Земли, выраженное в тех же единицах, что и dz , т.е. расстояние, деленное на длину полосы.

В случае, если ширина полосы существенно больше диаметра Земли, для оценки вероятности столкновения приходится уже решать двумерную задачу с учетом неравномерной плотности вероятности как вдоль полосы, соответствующей изменению среднего движения вдоль линии вариации, так и поперек нее. Формула для вычисления вероятности столкновения в этом случае приобретает вид

$$P_I = \frac{p_1 p_2}{\Lambda w} \pi R_0^2$$

где p_1 и p_2 — плотности вероятности вдоль полосы и поперек нее в точке, соответствующей центру Земли, Λ и w соответственно длина и ширина полосы, а R_0 — радиус захвата Земли.

16. Туринская шкала для оценивания угрозы столкновения Земли с астероидами и кометами

За последние десять лет был достигнут колоссальный прогресс как в отношении числа ежегодно открываемых опасных космических объектов, так и в методах предсказания их возможных столкновений с Землей в будущем. В настоящее время ежемесячно открываются несколько десятков АСЗ, в том числе опасных космических объектов. Информация о них как об объектах, нуждающихся в дополнительных наблюдениях для определения и уточнения орбиты, размещается на сайтах Центра малых планет (<http://cfawww.harvard.edu/iau/NEO/TheNEOPage.html>), Центрального узла фонда «Космическая стража» (<http://spaceguard.ias.rm.cnr.it/SSystem/SSystem.html>), Лаборатории реактивного движения (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>). Для каждого такого объекта по мере накопления наблюдений производится ретроспективный прогноз обстоятельств его сближений с Землей в прошлом для поиска изображений объекта среди архивных материалов и прогноз его движения в будущем с целью выяснения возможности получения новых наблюдений для уточнения орбиты и выяснения возможности его столкновения с Землей в обозримом будущем. В настоящее время уже созданы системы (CLOMON 1, CLOMON 2, Sentry), решающие эту задачу в автоматическом режиме. См. <http://spaceguard.ias.rm.cnr.it/tumblingstone/issues/num14/eng/clomon2.htm>, <http://neo.jpl.nasa.gov/news/news126.html>.

Когда достаточно крупный объект только что открыт, заранее не известно, какую опасность он может представить для Земли в ближайшем или более отдаленном будущем. Не исключено, хотя и маловероятно, что получение как можно большего числа наблюдений в текущем его появлении является единственной возможностью уточнить его орбиту перед предстоящим опасным или даже роковым сближением с Землей. Поэтому наблюдения вновь открываемых АСЗ являются чрезвычайно актуальными. Естественным средством привлечения к ним внимания наблюдателей является публикация всей доступной информации о новых объектах. Подобная открытость имеет и свою обратную сторону, связанную с тем, что информация о возможном столкновении Земли с космическим телом касается всех без исключения жителей планеты и ее неправильное понимание или неправильное истолкование способны вызвать глубокий общественный резонанс, экономические потрясения и даже всеобщую панику. Нельзя исключить возможности намеренного искажения фактов отдельными недобросовестными авторами или средствами массовой информации ради сенсационности подачи материала. Гораздо чаще приходится сталкиваться с непониманием и неправильным освещением существа проблемы, что также чревато нежелательными последствиями.

Как было показано в предыдущих параграфах, первоначальная орбита тела, найденная по наблюдениям в течение короткого промежутка времени,

является весьма ненадежной. Фактически, с выполненными наблюдениями оказывается совместим целый пучок орбит. Прогноз движения в такой ситуации сопряжен с большими ошибками. При этом расчеты, выполняемые на основе некоторого подмножества начальных данных, совместимых с наблюдениями, могут приводить к столкновению тела с Землей в не столь отдаленный момент времени, в то время как при других начальных данных в окрестности этого момента времени будет иметь место только более или менее тесное сближение тела с Землей. По мере уточнения орбиты область неопределенности прогноза сужается. Иногда обнаружение в архивных материалах одного или нескольких наблюдений астероида, выполненных за несколько лет до его текущего сближения с Землей, в состоянии драматически повлиять на точность прогноза и отвести тем самым угрозу столкновения тела с Землей. В других ситуациях исключить опасный прогноз удастся просто в результате продолжения слежения за телом и привлечения дополнительных наблюдений, выполненных на более длительном интервале, или же в результате более рафинированного анализа движения в будущем. Такие ситуации неоднократно имели место в прошлом, например, при публикации прогнозов движения таких объектов как 1997 XF₁₁, 1999 AN₁₀, 2000 SG₃₄₄ (<http://web.mit.edu/rpb/wgneo/>).

Учитывая негативный опыт публикации ряда сообщений о возможных столкновениях Земли с конкретными астероидами в течение ближайших десятилетий, которые очень скоро пришлось дезавуировать, Международный астрономический союз (МАС) разработал специальный порядок публикации сообщений о столкновениях Земли с космическими объектами (<http://web.mit.edu/rpb/wgneo/TechComm.html>). Он касается тех случаев, когда открытие или теоретические исследования приводят к заключению о том, что вероятность столкновения конкретного тела в определенный момент будущего равна или превышает вероятность столкновения с Землей тел того же самого или большего размера за время остающееся до столкновения (т.е. если вероятность столкновения превышает так называемый фоновый риск; в большинстве случаев угроза со стороны подобного тела будет оценена по Туринской шкале как 1 или более (см. об этом ниже).

МАС рекомендует исследователям воздерживаться на добровольной основе от публикации в любой форме сообщений о предстоящих столкновениях Земли с космическими телами, представляющими указанную выше степень угрозы, до тех пор, пока их результаты не будут конфиденциально рассмотрены специально созданной группой экспертов и официальными лицами МАС. Эксперты обязаны, вообще говоря в трехдневный срок, представить свои заключения автору исследования и официальным лицам МАС относительно правильности выполненных расчетов. В случае подтверждения результатов автору рекомендуется опубликовать их со ссылкой на экспертное заключение МАС. В случае несогласия конфиденциальное заключение экспертов дает воз-

возможность автору пересмотреть или исправить результаты своей работы.

Поскольку столкновения Земли с крупными космическими телами достаточно редки, обычным результатом развития событий является опровержение первоначально выполненного прогноза о ненулевой вероятности столкновения Земли с астероидом или кометой. Это не означает, что при его подготовке была допущена ошибка или что его не следовало публиковать. Обычно первоначальный прогноз адекватен тем наблюдениям, которые имеются в наличии на ранней стадии исследования. Как отмечалось, подобные прогнозы выполняют свою роль в науке, и сокрытие их результатов противоречит этике научного исследования. Тем не менее, приходится считаться с тем, что публикация информации о возможных столкновениях Земли с астероидами и кометами сопряжена с определенным риском ее искажения средствами массовой информации и неправильного восприятия этой информации в целом широкими слоями населения. В результате обсуждения этой проблемы была осознана необходимость разработки некоторой достаточно простой шкалы, которая позволяла бы формализовать оценку угрозы Земле со стороны того или иного космического тела. Такая шкала представляется совершенно необходимой при общении с непрофессиональной аудиторией и для использования в средствах массовой информации, так как результат оценки угрозы в баллах наиболее доходчив, наименее подвержен искажениям и сразу ставит возможные преувеличения в заранее очерченные рамки. Обсуждение проблемы было продолжено на Рабочем совещании в Турине в июне 1999 г., на котором Р. Бинзелом был представлен доклад по рассматриваемой проблеме. В результате обсуждения совещание приняло к использованию шкалу, которая получила название Туринской шкалы для оценки угрозы столкновений Земли с космическими телами (Binzel, 2000). Впоследствии шкала была одобрена МАС.

Туринская шкала построена по типу шкалы Рихтера для оценки землетрясений или шкалы скорости (силы) ветра по Бофорту. Угроза со стороны любого тела оценивается в этой шкале целыми числами от 0 до 10, где ноль означает отсутствие какой-либо угрозы, а 10 соответствует несомненной глобальной катастрофе. Оценка (категоризация) угрозы по Туринской шкале обязательно должна сопровождаться указанием момента соответствующего сближения космического тела с Землей (шкала разработана для оценки событий в пределах XXI века).

В основу построения шкалы положен учет двух основных факторов, определяющих оценку угрозы: вероятности столкновения и его кинетической энергии. Эти два фактора являются двумя измерениями, в пространстве которых производится оценка угрозы (рис. 31).

При этом кинетическая энергия столкновения, выраженная в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента, меняется в пределах от 1 Мт до 10^8 Мт. Как мы видели (см. §13), нижний предел соответствует телам около 20 м в

диаметре. Как правило меньшие по размеру тела полностью разрушаются в атмосфере и не представляют угрозы для обитателей Земли. Поэтому все события с меньшей энергией получают по Туринской шкале оценку 0. Верхний предел определяется величиной энергии, приведшей к массовому вымиранию видов живых существ на рубеже Мезозойской и Кайнозойской эры в истории Земли («гибель динозавров»).

По горизонтальной оси отложены вероятности столкновения в пределах от 10^{-8} до 1. События, имеющие вероятность, меньшую чем 10^{-8} , также рассматриваются как не представляющие реальной угрозы вне зависимости от сопутствующей им энергии и потому получают по Туринской шкале оценку 0.

Перед разработчиками Туринской шкалы стояла задача подразделить все пространство возможных событий на 11 областей (с номерами от 0 до 10) таким образом, чтобы переход от одной области к другой передавал ощущение нарастания угрозы, начиная от отсутствия таковой и кончая угрозой несомненной глобальной катастрофы. Эта задача не имеет однозначного решения. В окончательном варианте шкалы это сделано как показано на рисунке 31. При этом можно отметить следующие особенности найденного решения:

- Прямая линия, проведенная параллельно наклонным сторонам области 1 через ее нижний правый угол, примерно соответствует ежегодной частоте падения на Землю тел с заданной энергией. Так падения тел диаметром в 100 м ($E = 100$ Мт) случаются раз в $10^3 - 10^4$ лет (т.е. вероятность падения в определенном году составляет $10^3 - 10^4$), а катастрофы с выделением энергии в 10^8 Мт случаются раз в 10^8 лет. Таким образом, категория 1 Туринской шкалы присваивается событиям (сближение с телом заданного размера (энергии) с определенной вероятностью столкновения), от которых исходит угроза, не сильно отличающаяся от угрозы, создаваемой естественным фоном потенциально опасных тел примерно того же размера (энергии).
- Область, лежащая ниже и левее области 1, соответствует событиям, представляющим существенно меньшую угрозу чем ее создает естественный фон космических тел. Такие события относятся к категории 0 Туринской шкалы.
- Угроза со стороны того или иного события нарастает при переходе от одной области к другой, лежащей выше (с большей энергией) или правее (с большей вероятностью). Верхний правый угол занимает, как и следует ожидать, область несомненных (вероятность больше 99%) глобальных катастроф. Нарастание угрозы подчеркивается поэтапной сменной окраски областей, начиная с белой и кончая красной.

- Горизонтальные линии раздела между областями соответствуют пограничным значениям кинетической энергии, вызывающим локальные, региональные или глобальные катастрофы. Вертикальные линии раздела отделяют события, имеющие однопроцентную вероятность и 99% вероятность.

Таким образом, угроза любого предстоящего тесного сближения астероида или кометы с Землей может быть охарактеризована указанием даты сближения и присвоением ему категории по Туринской шкале. Последняя вычисляется на основе кинетической энергии тела относительно Земли и вероятности столкновения. Если в силу неопределенности известных значений энергии и/или вероятности столкновения соответствующая точка на рисунке 31 может принадлежать либо одной либо другой области, сближение может получить категорию типа «1 или 2» или «возможно, 8» («0 или 8») и т.д.

Надо отметить, что категоризация угрозы по Туринской шкале сама по себе мало что говорит непосвященному слушателю или читателю. Обращающийся к терминологии Туринской шкалы должен достаточно ясно представлять, какой смысл имеет отнесение события к той или иной категории и что стоит за этим. В таблице 13 дается сжатая качественная характеристика событий, принадлежащих к различным категориям Туринской шкалы.

В заключение, следует подчеркнуть, что категоризация сближения по Туринской шкале может быть изменена с течением времени, когда новые наблюдательные данные позволят уточнить орбиту, а следовательно, и вероятность столкновения и/или физические параметры (размеры, плотность, энергию) сближающегося тела. Как уже отмечалось, наиболее вероятным конечным результатом развития событий является отнесение тела к категории 0 по Туринской шкале (исключение возможности столкновения). В редких или исключительных случаях категория может оказаться равной 8, 9 или 10. В настоящее время только один астероид 1997 XR₂ имеет категорию 1 по Туринской шкале (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/index.html>). Все остальные имеют категорию 0.

Как всякая формализация, имеющая целью сведение результата действия многих факторов к некоторой простой схеме, Туринская шкала не дает представления обо всех деталях возможного столкновения. Так, например, два тела, существенно разных размеров, но имеющие одинаковую вероятность столкновения с Землей, получают в этой шкале одну и ту же категорию. Но ведь размер тела очень важен для оценки последствий столкновения. Важно также, в каком регионе Земли, в океане или на суше произойдет столкновения и т.д. В случае, если угроза станет реальной, такие сведения должны сообщаться дополнительно.

Таблица 13. ТУРИНСКАЯ ШКАЛА для оценивания угрозы столкновения астероидов и комет с Землей в XXI веке

События, скорее всего не имеющие последствий	0	Вероятность столкновения равна нулю или много ниже вероятности того, что случайный объект такого же размера столкнется с Землей в течение ближайших десятилетий. К этой категории относятся также любые небольшие объекты, для которых вероятность достижения поверхности Земли в нераспавшемся состоянии слишком мала
События, заслуживающие отслеживания	1	Вероятность столкновения крайне мала, примерно такая же, как вероятность случайного столкновения с Землей тела такого же размера в течение нескольких ближайших десятилетий
События, вызывающие озабоченность	2	Достаточно тесное, но не необычное сближение. Столкновение весьма маловероятно
	3	Тесное сближение с 1% или большей вероятностью столкновения, способного вызвать локальные разрушения
	4	Тесное сближение с 1% или большей вероятностью столкновения, способного вызвать региональное опустошение
Угрожающие события	5	Тесное сближение со значительной угрозой столкновения, способного вызвать региональные разрушения
	6	Тесное сближение со значительной угрозой столкновения, способного вызвать глобальную катастрофу
	7	Тесное сближение с крайне значительной опасностью столкновения, способного вызвать глобальную катастрофу
Несомненные столкновения	8	Столкновение, способное вызвать локальные разрушения. Падения подобных тел на Землю случаются с частотой одно событие в 50–1000 лет
	9	Столкновение, способное вызвать региональное опустошение. Падения подобных тел на Землю случаются с частотой одно событие в 1000–100000 лет
	10	Столкновение, способное вызвать глобальную климатическую катастрофу. Падения подобных тел на Землю случаются с частотой одно событие в 100000 лет или реже

17. Палермская техническая шкала для оценивания угрозы столкновения Земли с астероидами и кометами

Туринская шкала, рассмотренная в предыдущем параграфе, была разработана, прежде всего, для описания и распространения сведений об астероидно-кометной опасности средствами массовой информации. Она проста и доступна для понимания неспециалистов. Но те упрощения, которые были сознательно допущены при ее разработке, делают шкалу малоприменимой для использования в научных исследованиях. Отметим несколько таких упрощений.

Важной особенностью Туринской шкалы является то, что она целочисленная. Это облегчает восприятие оценки. Но события, относящиеся к одной и той же категории по Туринской шкале, фактически могут весьма сильно отличаться друг от друга. Например, два события, имея одинаковую вероятность, могут на два-три порядка отличаться по энергии столкновения. С другой стороны, мало отличающиеся друг от друга события могут оказаться по разные стороны границы раздела между областями и, как следствие, иметь различные категории, при этом не всегда различающиеся на единицу. Более того, в окрестности узловых точек близкие события могут отвечать целому набору различных категорий шкалы.

Любое событие с энергией, меньшей 1 Мт, согласно Туринской шкале, имеет категорию 0. С точки зрения привлечения общественного внимания это оправдано. Но в научном плане отслеживание событий с меньшими значениями энергии часто представляет интерес, и надо иметь возможность оценивать такие события по их важности для научного исследования. То же самое можно сказать и в отношении событий весьма маловероятных, но сопряженных с большой энергией.

Туринская шкала предназначена для оценки событий, происходящих в течение ближайшего столетия. Формально говоря, события более отдаленного будущего не имеют определенной категории по этой шкале. Между тем, уже сейчас для некоторых астероидов достаточно точные прогнозы столкновений могут быть сделаны на существенно более длительные интервалы времени. Более того, оценка по Туринской шкале не зависит непосредственным образом от времени до предстоящего сближения: вне зависимости от того, сколько времени осталось до сближения, несколько месяцев или несколько десятков лет, по Туринской шкале это событие получает одну и ту же категорию. Фактор времени влияет лишь опосредствованно, поскольку более близкое событие привлекает, естественно, больше внимания.

Таким образом, можно отметить, что для научных целей требуется система, которая бы позволяла оценивать различные события с точки зрения создаваемой ими угрозы вне зависимости от диапазона энергии, вероятности и времени до столкновения, причем эта система должна обеспечивать

непрерывность и сглаженность оценки в любом диапазоне. Справедливости ради, надо отметить, что идея создания такой шкалы была уже в общих чертах сформулирована в работе Р. Бинзела, посвященной описанию Туринской шкалы (Binzel, 2000). Но в развитом виде подобная шкала была представлена группой докладчиков на конференции в Палермо “Asteroids 2001. From Piazzì to the third millennium”, посвященной двухсотлетию открытия первого астероида. Поэтому данная шкала получила название Палермской (Chesley et al. 2002).

В указанной работе авторы прежде всего вводят понятие «ожидаемой энергии» события \tilde{E} , которая определяется как произведение вероятности события P_I на его энергию E

$$\tilde{E} = P_I E.$$

В том случае, когда тело несколько раз сближается с Землей на рассматриваемом интервале времени, причем каждому сближению соответствует определенная вероятность столкновения, то для каждого события может быть вычислена ожидаемая энергия и для всей последовательности событий может быть вычислена «совокупная ожидаемая энергия» как сумма ожидаемых энергий для частных событий.

Далее авторы сопоставляют энергию и вероятность ожидаемого столкновения с соответствующими фоновыми значениями, обусловленными случайными столкновениями Земли с астероидами и кометами за время, остающееся до рассматриваемого события. При этом учитывается осредненная на длительном интервале времени частота столкновений. Частота падения на Землю тел с энергией, большей или равной заданному значению E , может быть определена как

$$f_B = 0.03 E^{-4/5} \text{год}^{-1}, \quad (17.1)$$

где энергия исчисляется в мегатоннах.

Формула (17.1) выражает зависимость, очень близкую к эмпирическому распределению, найденному Е. Шумейкером главным образом на основании подсчета числа лунных кратеров (Shoemaker, 1983). Заметим, что частоту падения тел на Землю при условии ее малости (именно с такими событиями приходится иметь дело) можно рассматривать как годовую вероятность событий.

На рис. 32 представлена частота столкновения Земли с космическими телами как функция энергии. Учитываются тела с энергией, большей или равной заданной величине E . Кривая линия — эмпирическое распределение (Charman and Morrison, 1994), основанное преимущественно на результатах Шумейкера. Прямая линия — аппроксимация, определяемая формулой (17.1). Штриховая прямая — аппроксимация, использованная при разработке Туринской шкалы.

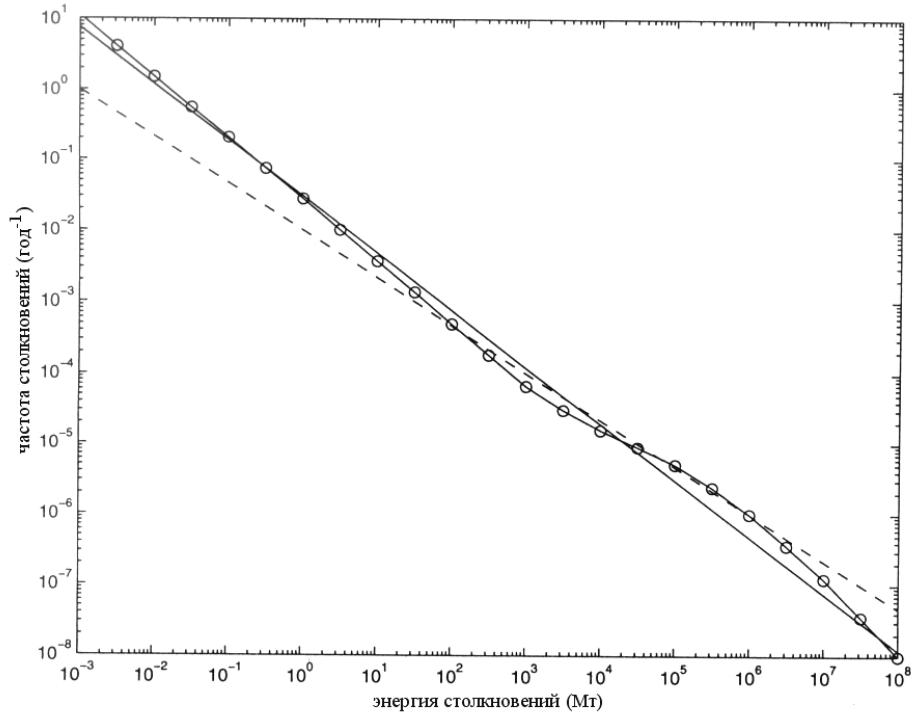


Рис. 32. Частота столкновения Земли с космическими телами как функция энергии.

Математически величина f_B представляет собой определенный интеграл

$$f_B = \int_E^{\infty} \gamma(E) dE, \quad (17.2)$$

где $\gamma(E)$ — частота столкновения Земли с телами, обладающими энергией E . Дифференцируя интеграл (17.2) по нижнему пределу и используя формулу (17.1), находим выражение для этой частоты в виде

$$\gamma(E) = \frac{3}{125} E^{-9/5} (\text{Мг}/\text{год}).$$

Найдем теперь ожидаемый поток энергии $\tilde{E}_B(E, \alpha)$, приносимой на Землю в течение года падающими на нее телами в некотором диапазоне энергии от $\alpha^{-1}E$ до αE

$$\tilde{E}_B(E, \alpha) = \int_{\alpha^{-1}E}^{\alpha E} E \gamma(E) dE.$$

Теперь имеется возможность сравнить ожидаемую энергию столкновения \tilde{E} для рассматриваемого события с общей энергией, приносимой на Землю телами в некотором диапазоне энергии от $\alpha^{-1}E$ до αE за время, оставшееся до столкновения. Последняя величина, очевидно, равна

$$\tilde{E}_B(E, \alpha) \Delta T,$$

где ΔT — время до столкновения, выраженное в годах.

Искомое отношение R_α

$$R_\alpha = \frac{\tilde{E}}{\tilde{E}_B(E, \alpha) \Delta T} \quad (17.3)$$

можно квалифицировать как ожидаемую энергию столкновения, взвешенную по отношению к потоку энергии, приносимой телами подобного же размера за оставшееся до столкновения время.

Можно показать, что выбирая α равным 1.865, выражение (17.3) можно свести к следующему

$$R = \frac{P_I}{f_B \Delta T} = \frac{P_I}{0.03 E^{-4/5} \Delta T},$$

которое в Палермской шкале получило наименование «нормализованного риска». Другими словами, нормализованный риск — это вероятность столкновения тела с Землей, взвешенная по отношению к вероятности столкновения с Землей тел такой же самой или большей энергии за время, оставшееся до предполагаемого столкновения. Десятичный логарифм этой величины P определяет Палермскую техническую шкалу для оценки угрозы столкновения тел с Землей

$$P = \lg R.$$

Все сказанное выше равным образом применимо и тогда, когда астероид или комета имеют на рассматриваемом интервале серию сближений с Землей. В этом случае вычисляется совокупный нормализованный риск, который сопоставляется с фоновым риском, исчисляемым за время до конца рассматриваемых событий.

Исходя из определения Палермской шкалы, можно отметить, что события, получающие оценку ноль, представляют такую же угрозу, которую создает естественный фон тел, способных сближаться с Землей. Значение шкалы, равное -2 , соответствует событию, представляющему в сто раз меньшую опасность по сравнению с естественным фоном, а оценка, равная $+3$, означает событие в тысячу раз более опасное по сравнению с вероятными столкновениями Земли со случайными телами такого же размера за время, остающееся до события.

Как связаны друг с другом Туринская и Палермская шкалы? Это разные шкалы. Не существует правила перехода от одной шкалы к другой, хотя бы уже потому, что Палермская шкала непрерывная, а Туринская — целочисленная. В целом, если событие имеет вероятность большую, чем фоновые события, то и по Палермской и по Туринской шкалам они имеют оценку, превосходящую 0. С другой стороны, события, имеющие оценку 1 по Туринской шкале, часто по Палермской шкале оказываются отрицательными, достигая по абсолютной величине нескольких единиц.

Наибольшую оценку угрозы по Палермской шкале в настоящее время имеет астероид (29075) 1950 DA, который был открыт еще в 1950 г., но затем был утерян на целых пятьдесят лет до 31 декабря 2000, когда его случайно переоткрыли. Объединение наблюдений 1950 г. с наблюдениями 2000–2001 гг. позволило существенным образом уточнить орбиту астероида. В период его очередного сближения с Землей 3–7 марта 2001, были выполнены радиолокационные наблюдения, которые дали возможность определить его форму и размеры (слегка асимметричный сфероид со средним диаметром около 1.1 км (рис. 33)), возможные положения в пространстве оси его вращения. Период вращения оказался одним из самых коротких для тела подобного размера, всего лишь 2.12 часа.



Рис. 33. Радарные изображения астероида (29075) 1950 DA, полученные в Аресибо 4 марта 2001 г. Во время этих наблюдений астероид находился в 7.8 млн км от Земли (<http://echo.jpl.nasa.gov/~ostro/da/index.html>)

Когда орбита астероида была уточнена с учетом оптических и радарных наблюдений и был выполнен прогноз движения астероида в будущем, оказалось, что он имеет необычайно тесное сближение с Землей 16 марта 2880 (Giorgini et al., 2002). К сожалению, на сегодняшний день физические параметры астероида и положение оси вращения известны недостаточно точно. В зависимости от их значений вероятность столкновения оценивается в диапазоне от 0 до 1/300. Дело в том, что на интервале почти в 880 лет астероид подвергается действию различных сил, в том числе таких, действием которых на менее значительных интервалах времени обычно пренебрегают по причине их малости. К ним, в частности, относится световое давление и эффект Ярковского (анизотропия переизлучения солнечной радиации (см.

Таблица 14. Астероиды, имеющие в настоящее время наибольшие оценки угрозы по Палермской шкале (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>).

Объект	Годы	Число столк.	Вероят- ность	\dot{v} (км/с)	H	D (км)	P_{max}	P_{sum}	T_{max}
1997 XR ₂	2101–2101	2	9.7e–05	7.17	20.8	0.230	–2.71	–2.44	1
2002 XY ₃₈	2084–2101	8	4.9e–04	6.61	23.0	0.090	–3.01	–2.74	0
1979 XB	2056–2101	3	3.3e–07	24.54	18.5	0.685	–3.14	–3.07	0
2000 SG ₃₄₄	2068–2101	68	1.8e–03	1.37	24.8	0.040	–3.43	–3.08	0
2000 QS ₇	2053–2053	2	1.3e–06	12.32	19.6	0.420	–3.46	–3.27	0
1994 UG	2025–2102	85	7.3e–06	6.31	21.3	0.187	–3.51	–3.37	0
1994 WR ₁₂	2054–2074	49	2.7e–05	9.87	22.1	0.129	–4.00	–3.39	0
1994 GK	2051–2071	7	6.1e–05	14.87	24.2	0.050	–3.84	–3.83	0
2000 SB ₄₅	2074–2101	83	1.5e–04	7.54	24.3	0.050	–4.28	–3.86	0
2001 CA ₂₁	2020–2073	4	1.7e–08	30.66	18.5	0.678	–4.10	–3.89	0
1998 HJ ₃	2100–2100	2	7.2e–08	24.23	18.4	0.700	–4.16	–3.93	0

§3). Последний эффект зависит от положения оси вращения астероида в пространстве и направления его вращения. На интервале в 880 лет эти эффекты становятся вполне ощутимыми для тела диаметром в 1.1 км и в состоянии оказать заметное влияние на вероятность столкновения. Неопределенность с положением оси вращения не позволяет дать более точный прогноз. В самом худшем случае, т.е. когда вероятность столкновения составляет 1/300, оценка угрозы столкновения по Палермской шкале равна +0.17. Это означает, что риск столкновения с данным астероидом в 2880 г. превосходит в $10^{0.17}$ раз, т.е. в полтора раза, фоновый риск, определяемый возможными столкновениями до 2880 г. с телами той же самой или большей энергии. На сегодняшний день астероид (29075) 1950 DA — единственное тело, для которого риск столкновения на исследованном интервале (для разных тел он различен, но обычно составляет сто лет) превосходит фоновый риск. Для сравнения приведем вырезку из таблицы, содержащей данные об астероидах, имеющих в настоящее время наибольшие оценки угрозы по Палермской шкале (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>).

В таблице 14 приводится предварительное обозначение астероида, интервал времени, когда имеют место возможные столкновения, число возможных столкновений, отвечающих динамически различным траекториям, приводящим к столкновению в данном году (например, включающим дополнительные обороты вокруг Солнца или отклонения траектории при предыдущих сближениях), совокупная вероятность столкновения, скорость относительно Земли на бесконечности (т.е. на границе сферы действия), абсолютная звездная величина астероида, оценка диаметра астероида, при условии что альбе-

до в визуальных лучах равно 0.154, совокупная оценка угрозы по Палермской шкале от всех сближений и оценка угрозы от сближения, создающего наибольший риск, оценка угрозы по Туринской шкале.

18. Кометы

Кометы, как и астероиды, относятся к малым телам Солнечной системы. Размеры ядер известных комет действительно малы: как правило, они не превышают 50 км, хотя нельзя исключить, что размеры ядер могут достигать сотен километров. Здесь необходимо упомянуть две занумерованные малые планеты, которые обнаруживают признаки кометной активности. По этой причине они входят также в кометные каталоги. Это малые планеты (2060) Chiron и (4015) Wilson-Harrington, они же кометы 95P/Chiron и 107P/Wilson-Harrington. По имеющимся оценкам (Fernandez et al. 2002), диаметр (2060) Chiron составляет около 150 км.

Известны кометы с глубокой древности. В отличие от астероидов вещество кометы при приближении к Солнцу испаряется (сублимирует), вокруг ядра образуется более или менее яркая оболочка (туманность, кома, атмосфера). Под действием давления солнечных лучей и солнечного ветра очень часто образуется хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону. Эти особенности делают кометы одними из самых ярких и впечатляющих объектов на земном небосводе (рис.34). Средние размеры комы составляют порядка 100 тыс. км. Хвосты комет имеют длину до 10 млн. км, а у некоторых комет достигают 150 млн. км.



Рис. 34. Внешний вид яркой кометы (<http://www.solarviews.com>)

Кометы в течение долгого времени были и все еще остаются источником многих страхов и предрассудков. Аристотель считал, что кометы — это сгу-

стившиеся испарения в атмосфере Земли. Для понимания природы комет как небесных тел понадобились усилия многих поколений ученых. Первым такое предположение высказал Тихо Браге. И.Кеплер считал, что движение комет происходит по прямым линиям. По мнению Дж.Рафнера (Колдер, 1984), для Кеплера основной аналогией кометы была ракета, которая вспыхивает, набирает скорость, а затем теряет ее, двигаясь примерно по прямой. Наиболее тщательная разработка теории прямолинейного движения комет дается в труде польского астронома Яна Гевелия “Cometographia”, опубликованном в 1668 г. Согласно закону всемирного тяготения, движение небесных тел вокруг Солнца может происходить по любому коническому сечению, в фокусе которого находится Солнце. И.Ньютон, наблюдая комету 1680 г., пришел к выводу, что ее истинный путь в Солнечной системе в первом приближении представляет собой параболу. Английский астроном Э.Галлей, современник и друг Ньютона, занялся поисками комет, которые возвращались в прошлом к Солнцу через примерно равные промежутки времени. Обработав наблюдения более 20 комет, Галлей обратил внимание на то, что орбиты комет, наблюдавшихся в 1531, 1607 и 1682 гг., одинаково ориентированы в пространстве, движение комет — обратное, и появления разделены примерно одинаковыми интервалами. (Термин «появление» означает период нахождения кометы вблизи Солнца, когда она становится доступной для наблюдений; гиперболические и параболические кометы являются неперiodическими и появление у них может быть всего одно). Галлей сделал вывод о том, что это были не три кометы, а одна, движущаяся по очень вытянутой эллиптической орбите, которая возвращала ее к Солнцу каждые 75–76 лет, и предсказал ее следующее появление в 1758 г. Комета, которая действительно была переоткрыта в 1758 г., получила имя «кометы Галлея» (рис.35). В 1986 г. эта комета была исследована с помощью космических аппаратов, которые впервые получили изображение ядра кометы. Минимальное расстояние до кометного ядра, которое было достигнуто европейским аппаратом Джотто, составило 596 километров.

Выделяют следующие структурные составляющие кометы при ее движении вокруг Солнца: ядро, кому — газо-пылевую оболочку, окружающую ядро, газовый хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону, и пылевой хвост, как правило отклоняющийся от направления Солнце-кометное ядро. Строение «средней» кометы показано на рис.36.

Согласно современным представлениям, ядро кометы является смесью водяного льда, замороженных в него легколетучих веществ, пыли и, возможно, крупных фрагментов каменистого вещества. Вещество ядра кометы очень пористое (средняя плотность составляет около 0.5 г/см^3), его можно сравнить с огромным снежным комом. При приближении кометы к Солнцу под действием солнечной радиации происходит сублимация летучей составляющей ядра, а на его поверхности образуется корка из нелетучего вещества. Иногда

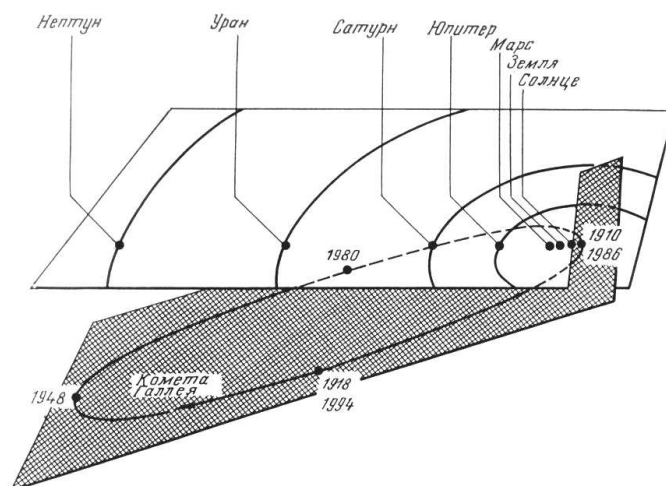


Рис. 35. Орбита кометы Галлея в Солнечной системе (Колдер, 1984).

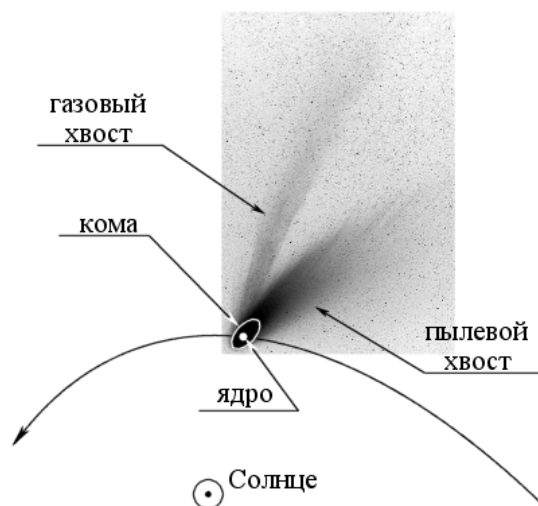


Рис. 36. Структурные составляющие кометы

под давлением испаряющихся газов часть корки может быть сброшена, что приводит к вспышкам блеска или даже фрагментации кометного ядра.

Чем больше прохождений вблизи Солнца совершила комета, тем большую часть поверхности может занимать корка, препятствующая дальнейшей сублимации. В конце концов, комета становится «потухшей» и для наблюдателя выглядит так же, как малая планета. Такие «потухшие» кометные ядра, как это уже отмечалось, вполне могут быть частью популяции АСЗ. Возможен и другой сценарий эволюции кометного ядра, когда постепенно размер его

все уменьшается до превращения кометы в мини-комету, а затем и полной ее дезинтеграции.

Кометные ядра имеют форму, заметно отличающуюся от шарообразной (рис.37) и напоминающую неправильную форму некоторых небольших астероидов. Она вполне может являться результатом неравномерной инсоляции и неравномерного испарения вещества с поверхности ядра, вращающегося вокруг некоторой произвольным образом ориентированной в пространстве оси. В результате испарения вещества меняются моменты инерции ядра, что приводит к сложной эволюции его вращения.

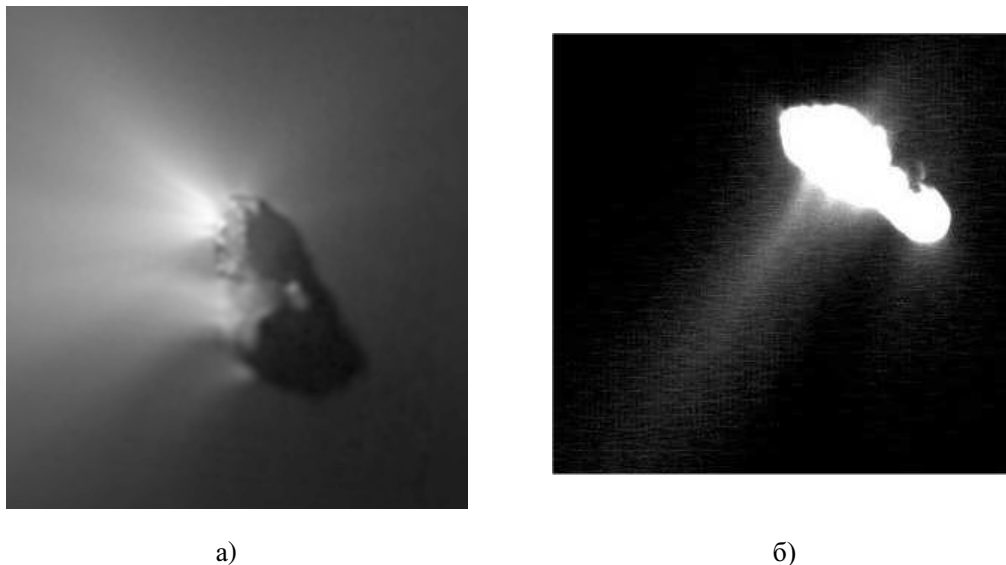


Рис. 37. а) Ядро кометы Галлея ($16 \times 8 \times 8$ км³); б) ядро кометы Борелли (~8 км в длину) (<http://www.jpl.nasa.gov/neo/images.html>)

В отличие от астероидов, кометы обнаруживают в своем движении характерные особенности, которые принято называть негравитационными эффектами. Под воздействием испаряющегося с его поверхности вещества ядро кометы испытывает реактивное ускорение. Это ускорение может как уменьшать, так и увеличивать скорость движения кометы вокруг Солнца в зависимости от комбинации направления движения ядра по орбите и направления собственного вращения ядра, от рельефа поверхности ядра, от распределения на поверхности областей активной сублимации. Так как вектор результирующего негравитационного ускорения не обязательно проходит через центр ядра, то это может также вызывать изменение скорости вращения ядра, вынужденную прецессию. Совместное действие всех этих эффектов может приводить к отделению слабосвязанных фрагментов или даже разделению ядра, что и отмечалось наблюдателями неоднократно.

Особенности состава комет делают их физическую и динамическую эволюцию более быстрой по сравнению с малыми планетами, а определение орбит и предсказание особенностей движения более трудоемким и менее уверенным. В то время как шесть параметров орбиты полностью характеризуют движение малой планеты на всем интервале ее наблюдений, если достаточно точно учтены гравитационные возмущения и аккуратно выполнена редукция наблюдений, то для точного представления движения большинства комет необходимо определять из наблюдений еще и компоненты негравитационного ускорения. Так как эти последние могут изменяться, то одним набором параметров зачастую можно удовлетворительно представить положения кометы только в нескольких появлениях. Негравитационные эффекты могут изменять период обращения кометы на величину до нескольких дней. Так, например, орбита кометы Галлея, полученная по наблюдениям 1835 и 1910 годов без учета негравитационных эффектов, дает ошибку в моменте прохождения кометой перигелия в 1759 г. в 4.3 суток. Для расчетов возможного столкновения кометы с Землей такая ошибка является существенной.

19. Особенности орбит комет

Если орбиты большинства астероидов имеют умеренные значения эксцентриситетов и наклонов, то большинство комет имеет вытянутые орбиты со значительными эксцентриситетами, вплоть до параболических с эксцентриситетом, равным единице, и слабогиперболических с эксцентриситетами, лишь немного превышающими единицу. Главным параметром, по которому кометы разделяют на несколько групп, является их период обращения вокруг Солнца или большая полуось, которые связаны третьим законом Кеплера,

$$2\pi a^{3/2} = k\sqrt{m_0 + m}P,$$

где a — большая полуось, P — период обращения, m_0 — масса Солнца, m — масса кометы, k^2 — гравитационная постоянная, выраженная в соответствующих единицах. Если задавать a в а.е., P — в сутках, а массу Солнца принять за единицу, то $k = 0.01720209895$ (постоянная Гаусса). Так как для комет значение m очень мало, $\sim 10^{-16}$ массы Солнца, то предыдущее соотношение записывается в виде

$$2\pi a^{3/2} = kP.$$

В таблице 15 представлено распределение комет по группам и их количество в каждой группе (по состоянию на 5 января 2003 г. в каталоге кометных орбит, поддерживаемом в Центре малых планет, содержатся сведения о 1679 кометах).

Таблица 15. Распределение комет по группам в зависимости от величины периода (большой полуоси)

Группа	Период P (лет)	Большая полуось a (а.е.)	Количество
Гиперболические	непериод.	<0	185
Параболические	непериод.	∞	898
Близпараболические (почтипараболические)	—	~ 100000	219
Эллиптические:			
долгопериодические	>200	>34	59
кометы типа кометы Галлея	20–200	7.5–34	44
короткопериодические, или кометы семейства Юпитера	<20	<7.5	274

По расположению афелиев кометных орбит вблизи орбит больших планет кометы относят к различным семействам. На рис.38 показано распределение кометных орбит по афелийным расстояниям в интервале от 3 до 40 а.е. Наиболее многочисленным является семейство Юпитера, хорошо заметное на рис.38 а) в интервале 5–6 а.е., в интервале 8–10 а.е. находится менее многочисленное, чем семейство Юпитера, семейство Сатурна. На рис.38 б) в интервале 17–21 а.е. находится слабо выраженное семейство Урана, а в интервале от 28 до 38 а.е. — также немногочисленное семейство Нептуна. У внутренних планет кометные семейства пока не обнаружены, хотя существование «потухших» комет или их фрагментов на таких орбитах вполне вероятно. В значительном числе представлены близпараболические кометы, афелии которых концентрируются на расстояниях от Солнца порядка 100000 а.е. Предполагается, что здесь находится резервуар комет, содержащий до 10^{11} кометных ядер. Эти ядра, движущиеся на периферии Солнечной системы по разнообразным орбитам, образуют так называемое облако Оорта (по имени ученого, впервые высказавшего предположение о его существовании). Время от времени некоторая часть комет из облака, по-видимому, под влиянием звездных возмущений, приобретает возможность проникать во внутренние области Солнечной системы. Там они становятся наблюдаемыми как параболические или близпараболические, часто очень яркие кометы. Возможно, некоторое количество комет со слабо выраженной гиперболическостью орбит приходит из межзвездного пространства.

Значения наклонов короткопериодических комет к эклиптике невелики. В

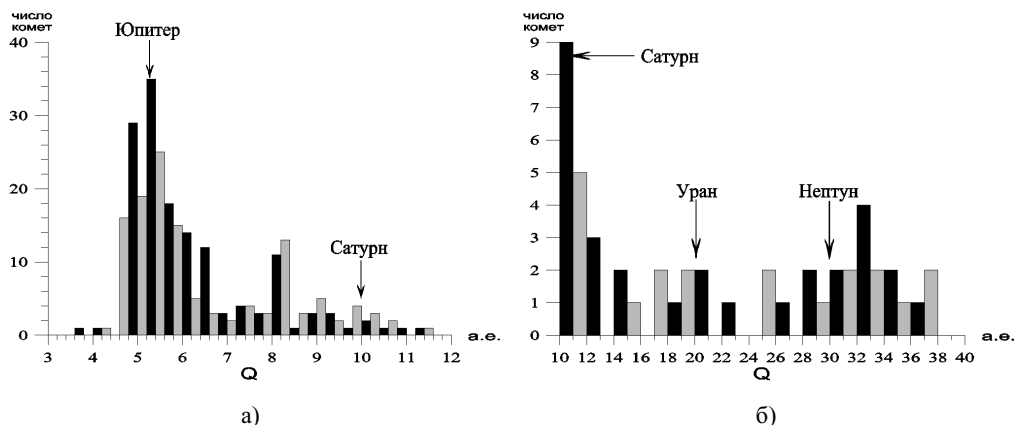


Рис. 38. Распределение кометных орбит по афелийным расстояниям Q : а) от 3 до 12 а.е. б) от 10 до 40 а.е.

других группах комет они могут принимать значения от 0° до 180° , причем распределение по наклонам — равномерное.

20. Кометы как опасность для Земли

Уже в конце XVII века высказывались предположения о возможных столкновениях комет с Землей и неизбежном в результате такого столкновения «конце света». В 1770 году комета Лекселя прошла на расстоянии от Земли в 2.25 млн. км. (что только в 6 раз больше расстояния от Земли до Луны), подтвердив тем самым реальность угрозы. По оценкам Бейли (Bailey, 1990), доля ударных кратеров на земной поверхности, вызванных столкновениями с кометами, может достигать 10% или выше. Хотя опасных для Земли комет гораздо меньше, чем АСЗ, динамические и физические особенности комет таковы, что опасность эта вполне реальна. Так как фактор внезапности, непредсказуемости появления играет важную роль, то наибольшую опасность представляют параболические и близпараболические кометы. Среднее количество таких комет, открываемых в год, за последние несколько лет составило 10–15. Как уже отмечалось, наклоны орбит этих комет могут принимать значения от 0° до 180° (в отличие от короткопериодических комет, наклоны орбит которых невелики), а это означает, что для части комет возможно столкновение с Землей на встречных курсах. При этом скорость столкновения может достигать 72 км/с (см. Приложение, таблица 3). Раннее обнаружение параболических и близпараболических комет является единственной гарантией того, что в распоряжении землян будет от нескольких месяцев до нескольких лет для предотвращения их возможного столкновения с Землей. Хотя энергия столкновения с Землей подсчитана далеко не для всех комет

в таблице 3 Приложения из-за отсутствия данных о размерах ядра, тем не менее, среди них встречаются кометы, столкновение с которыми способно привести к уничтожению большинства видов земных организмов.

Еще два фактора, делающих кометы особенно опасными объектами, — это изменчивость их орбит и возможность разрушения ядер, фрагменты которых могут оказаться на орбитах, отличных от орбит основного ядра, что затрудняет процедуру вычисления точной орбиты и, соответственно, прогноз вероятности столкновений (см. таблицу 4 Приложения, данные для различных фрагментов комет).

Рисунки 39 а), б), 40 а), б), 41 а), б) показывают распределение различных групп комет по перигельным расстояниям в пределах от 0 до 3.0 а.е.

Потенциально опасными могут считаться кометы, перигельные расстояния которых < 1.3 а.е. Видно, что наибольшее количество таких комет находится на параболических и близпараболических орбитах, т.е. они в первый раз на человеческой истории оказываются в области внутренних планет Солнечной системы. На рис.42 приводится распределение комет с параболическими орбитами по минимальному расстоянию (Δ_{min}) между орбитами Земли и кометы. Обращает внимание аномально большое количество параболических комет с Δ_{min} в интервале 0.9–1.0 а.е. Это так называемые «кометы, царапающие Солнце» (sungrazing comets или «кометы семейства Крейца»). Кометы этого семейства наблюдаются уже давно, с XVII века, но в последние годы число известных комет этого типа резко увеличилось благодаря запуску космического аппарата SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) для изучения Солнца и его атмосферы. SOHO — совместный проект Европейского космического агентства и НАСА — находится на орбите вблизи точки Лагранжа L_1 (между Землей и Солнцем) и поэтому может наблюдать Солнце непрерывно. Эти кометы обнаруживаются на фоне солнечной атмосферы (рис. 43). Обычными средствами на Земле такие кометы не могут наблюдаться из-за их близости к Солнцу. С точки зрения возможности столкновения с Землей, эти кометы опасности не представляют, так как точки пересечения их орбит с плоскостью орбиты Земли (узлы орбиты) находятся далеко от орбиты Земли.

Гистограмма, представленная на рис.42, позволяет заключить, что распределение параболических комет по минимальному расстоянию от орбиты Земли в широком диапазоне от 0 а.е. до 0.8 а.е. является достаточно равномерным. Некоторый спад распределения по мере увеличения расстояния вполне объясним наблюдательной селекцией. В интервале 0–0.05 а.е. находится 27 комет, что составляет 0.04–0.05 (в среднем 0.045) от общего числа параболических комет за вычетом комет семейства Крейца. Это позволяет оценить частоту столкновения таких комет с Землей.

Чтобы тело могло столкнуться с Землей, его орбита должна проходить на минимальном расстоянии от орбиты Земли, не превышающем радиуса захва-

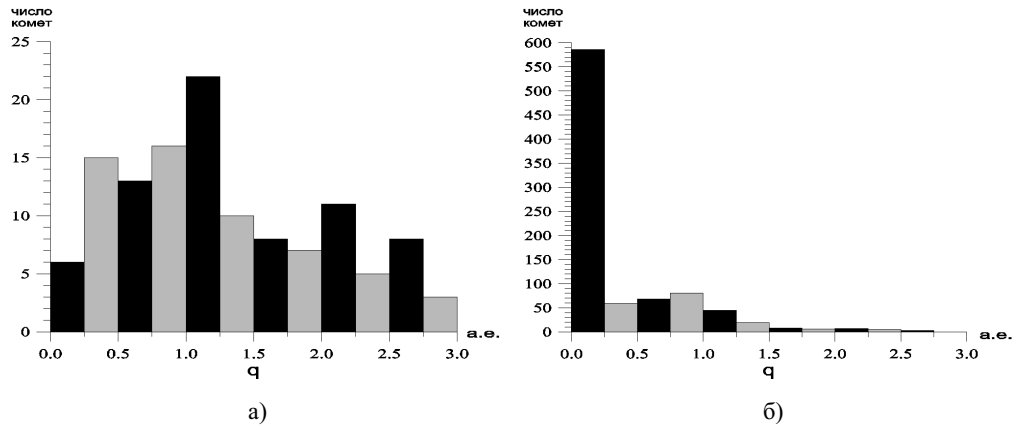


Рис. 39. а) Распределение гиперболических комет по перигельным расстояниям; б) распределение параболических комет по перигельным расстояниям.

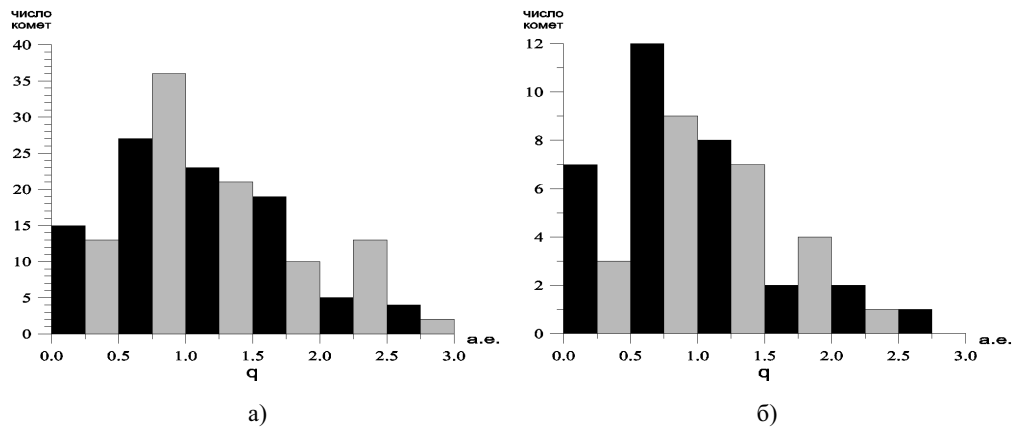


Рис. 40. а) Распределение близпараболических комет по перигельным расстояниям; б) распределение долгопериодических комет по перигельным расстояниям.

та Земли. При относительной скорости порядка 50 км/с (см. §15) радиус захвата составляет 6700 км, или 0.000045 а.е. Поскольку распределение равномерное, на таком расстоянии проходят орбиты $0.045 \times 0.000045 / 0.05 = 0.00004$ всех параболических комет. Чтобы столкновение реально имело место, Земля должна оказаться вблизи того места, где находится комета при ее максимальном сближении с орбитой Земли. Это уменьшает вероятность столкновения в $2\pi / 0.000090 = 70000$ раз (0.000090 — это удвоенное значение радиуса захвата). Поскольку ежегодно открывается порядка десяти параболических комет,

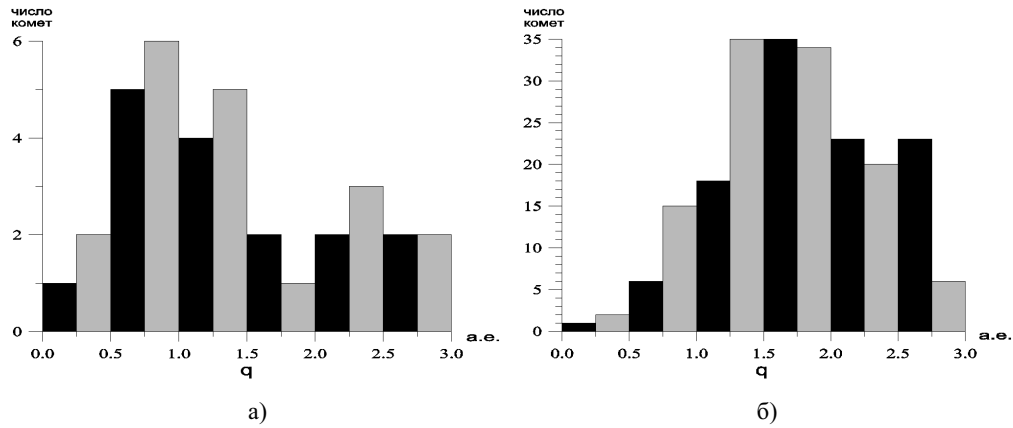


Рис. 41. а) Распределение комет типа Галлея по перигельным расстояниям; б) распределение комет семейства Юпитера по перигельным расстояниям.

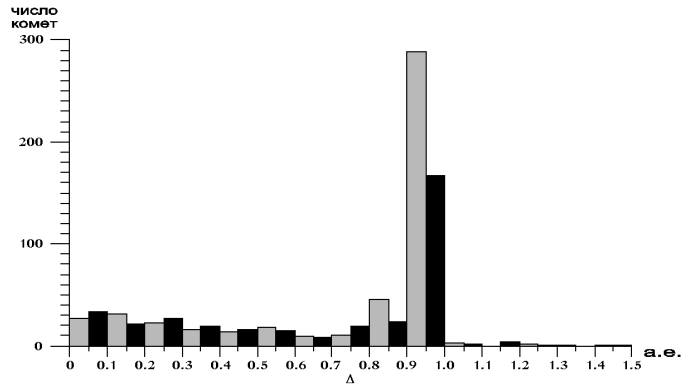


Рис. 42. Распределение орбит параболических комет по минимальному расстоянию от орбиты Земли

этим путем находим, что столкновения Земли с такими кометами случаются примерно один раз в 175 млн лет. Учет близпараболических и гиперболических комет увеличивает частоту столкновения с непериодическими кометами и с кометами очень долгих периодов до примерно одного столкновения за 110 млн лет. Надо учесть, что размеры ядер непериодических комет, как и комет с периодами в миллионы лет оцениваются как весьма большие. На фоне данных таблицы 12, §13 (частота столкновения десятикилометрового тела один раз в 10^8 лет) полученная оценка представляется вполне ожидаемой.

В таблице 3 Приложения приводится информация о 42 периодических кометах, которые могут рассматриваться как представляющие угрозу для Земли. В таблицу включены кометы с параметром $MOID < 0.15$ a.e. Кроме

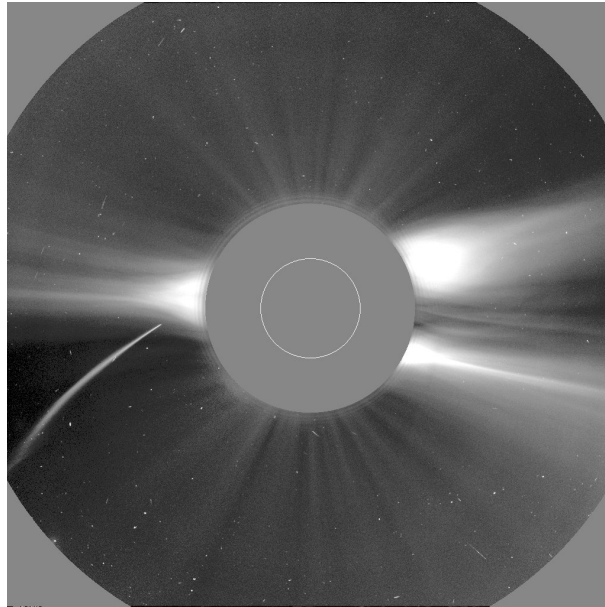


Рис. 43. Комета, падающая на Солнце (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>)

того, в таблице приведены сведения о четырех почтипараболических кометах. Орбиты двух из них пролегают на расстояниях меньше 800 тысяч км от Земли. Приведены также данные для двух недавно наблюдавшихся комет Хейла-Бопша и Хьякутаке, из которых первая обладает гигантским ядром в 45 км.

В таблице 4 Приложения приводятся данные о сближениях указанных периодических комет с Землей на интервале до 2200 г. В таблицу включены сближения до минимальных расстояний, не превышающих 0.15 а.е.

21. Метеоры и метеорные потоки

Кроме астероидов и кометных ядер в межпланетном пространстве находится большое количество более мелких тел. Одним из их источников является фрагментация астероидов при столкновениях. Сублимация кометного вещества также приводит к тому, что в межпланетное пространство выбрасывается большое количество очень мелких частиц, образующих пылевые хвосты комет, и более крупных фрагментов с размерами до десятков сантиметров. Иногда ядро кометы полностью распадается с образованием нескольких крупных фрагментов и большого количества более мелких обломков, что, например, произошло с кометой Веста (рис.44).

В результате частичной или полной фрагментации ядра образуются «облака» твердых частиц-метеороидов, сопровождающих кометное ядро. При

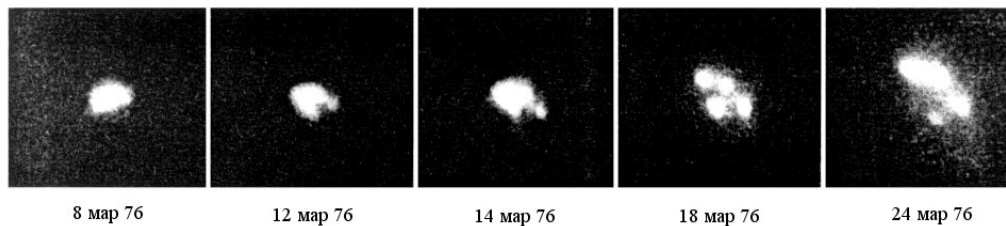


Рис. 44. Фрагменты кометы Веста (Колдер, 1984).

встрече метеороидов с земной атмосферой наблюдаются такие явления как метеоры, болиды или даже выпадение не успевших полностью разрушиться фрагментов на поверхность Земли (метеориты). Связанные с определенной кометой метеороиды образуют метеорный поток. В «молодых» потоках облака метеороидных частиц движутся преимущественно вблизи кометного ядра, в «старых» — могут распределяться вдоль всей орбиты в результате различия скоростей выброса частиц и неодинакового действия на них гравитационных возмущений. Для земного наблюдателя «молодость» метеорного потока, наблюдающегося при встрече Земли с потоком метеороидов, проявляется в неравномерном количестве наблюдаемых от года к году метеоров, принадлежащих к данному потоку. При встрече Земли с молодым потоком в отдельные годы могут наблюдаться метеорные ливни и штормы (терминология объясняется аналогией с метеорологическими явлениями). Как правило у таких потоков хорошо идентифицируется комета-родоначальница. У «старых» потоков такая комета не наблюдается по причине ее полного разрушения. На рис.45 показано, как выглядел метеорный дождь Леонид в 1998 году.

Как правило в потоках преобладают мелкие пылевые частицы, которые полностью сгорают в верхних слоях атмосферы. Но могут быть и достаточно крупные тела (от нескольких дециметров до нескольких метров или даже нескольких десятков метров), столкновение которых с Землей может привести к локальным разрушениям (Rykhlova et al., 1998; Микиша и др., 1999). И вне всякого сомнения, столкновения с такими телами опасны для космических аппаратов.

В таблице 16 приводится основанная на данных Международной метеорной организации (International Meteor Organization, <http://www.imo.net/>) информация о метеорных потоках, которые могут наблюдаться визуально, а именно: название потока, период активности, максимум активности, координаты радианта, скорость относительно Земли и зенитное часовое число, которым измеряется мощность потока. Зенитное часовое число ZHR — это расчетное максимальное число метеоров, которое увидел бы наблюдатель за один час на совершенно ясном небе при условии, что радиант находится в зените. Из общего количества метеорных потоков здесь приводятся те, кото-

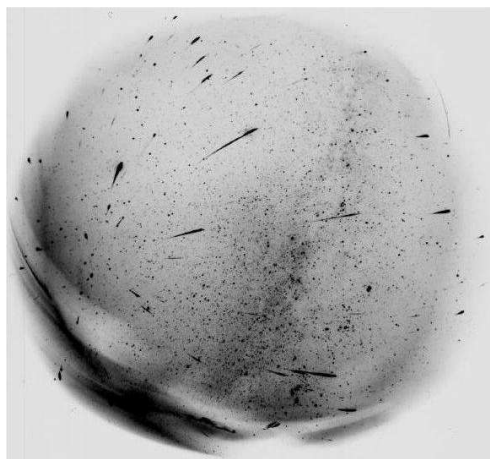


Рис. 45. Метеорный дождь Леонид в 1998 г. Фото всего неба получено с экспозицией 4 часа в астрономической обсерватории Модра в Словакии во время максимума активности потока. На оригинальном кадре можно насчитать 156 метеоров

рые в меридиане могут наблюдаться на широте Москвы на высоте не менее $25\text{--}30^\circ$ над горизонтом.

Радиантом потока называется точка (область) на небесной сфере (рис.46), откуда, как кажется земному наблюдателю, вылетают метеоры, и которая определяется продолжением траекторий отдельных метеоров на небесной сфере до их пересечения. У протяженных метеорных потоков, которые наблюдаются в течение нескольких суток, можно обнаружить смещение (движение) радианта относительно звезд. Это смещение происходит из-за движения Земли по орбите и вызываемых этим движением изменений условий встречи Земли с потоком.

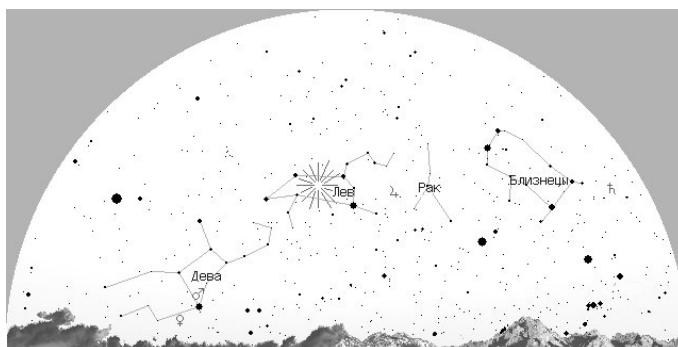


Рис. 46. Радиант Леонид (© В.С.Погудин, <http://astroschool.ru>)

Таблица 16. Метеорные потоки, наблюдаемые визуально в северном полушарии (высота над горизонтом в меридиане не менее 25–30° на широте Москвы)

Название потока	Период активности	Максимум активности потока	Радант $\alpha(^{\circ}) \delta(^{\circ})$	v (км/с)	ZHR
Квадрантиды	01 янв. –05 янв.	04 янв.	230 +49	41	120
дельта-Канцириды	01 янв. –24 янв.	17 янв.	130 +20	28	4
дельта-Леониды	15 фев. –10 мар.	24 фев.	168 +16	23	2
Виргиниды	25 янв. –15 апр.	(25 мар.)	195 –04	30	5
Лриды	16 апр. –25 апр.	22 апр.	271 +34	49	18
эта-Аквариды	19 апр. –28 мая	06 мая	338 –01	66	60
Июньские Боотиды	26 июнь–02 июль	27 июня	224 +48	18	пер.
Пегасиды	07 июль–13 июль	10 июля	340 +15	70	3
альфа-Каприкорниды	03 июль–15 авг.	30 июля	307 –10	23	4
Северные дельта-Аквариды	15 июль–25 авг.	09 авг.	335 –05	42	4
Персеиды	17 июля–24 авг.	13 авг.	046 +58	59	110
каппа-Цигниды	03 авг. –25 авг.	18 авг.	286 +59	25	3
Северные йота-Аквариды	11 авг. –31 авг.	20 авг.	327 –06	31	3
альфа-Ауригиды	25 авг. –08 сен.	01 сен.	084 +42	66	7
дельта-Ауригиды	05 сен. –10 окт.	09 сен.	060 +47	64	6
Писциды	01 сен. –30 сен.	20 сен.	005 –01	26	3
Дракониды	06 окт. –10 окт.	09 окт.	262 +54	20	пер.
эпсилон-Геминиды	14 окт. –27 окт.	18 окт.	102 +27	70	2
Ориониды	02 окт. –07 нояб.	21 окт.	095 +16	66	20
Южные Тауриды	01 окт. –25 нояб.	05 нояб.	052 +13	27	5
Северные Тауриды	01 окт. –25 нояб.	12 нояб.	058 +22	29	5
Леониды	14 нояб.–21 нояб.	18 нояб.	153 +22	71	100
альфа-Моноцеротиды	15 нояб.–25 нояб.	22 нояб.	117 +01	65	пер.
хи-Ориониды	26 нояб.–15 дек.	02 дек.	082 +23	28	3
Моноцеротиды	27 нояб.–17 дек.	09 дек.	100 +08	42	3
сигма-Гидриды	03 дек. –15 дек.	12 дек.	127 +02	58	2
Геминиды	07 дек. –17 дек.	14 дек.	112 +33	35	120
Кома-Беренициды	12 дек. –23 янв.	20 дек.	175 +25	65	5
Урсиды	17 дек. –26 дек.	23 дек.	217 +76	33	10

Литература

- Вуд Дж. 1971. Метеориты и происхождение Солнечной системы. «Мир», М., 176 с.
- Всехсвятский С.К. 1958. Физические характеристики комет. ГИФМЛ, М., 575 с.
- Всехсвятский С.К. 1967. Кометы 1961–1965 гг. «Наука», М., 88 с.
- Всехсвятский С.К. 1979. Физические характеристики комет 1971–1975 гг., «Наукова думка», Киев, 124 с.
- Герелс Т. 1974. Фотометрия астероидов. В сборнике Планеты и спутники, 367–430. Под ред. А.Дольфюса. «Мир», М., 580 с.
- Железнов Н.Б. 2002. Исследование двойного астероида 1996 FG₃. Сообщения ИПА РАН, № 147.
- Колдер Н. 1984. Комета надвигается! «Мир», М., 176 с.
- Лупишко Д.Ф. 1998. Улучшенные альбедо и диаметры астероидов. Астрон. вестник, т. 32, 141–146.
- Лупишко Д.Ф., Лупишко Т.А. 2001. Об источниках происхождения астероидов, сближающихся с Землей. Астрон. вестник, т. 35, 250–256.
- Мартынов Д.Я. 1971. Курс общей астрофизики. «Наука», М., 616 с.
- Микиша А.М., Смирнов М.А., Барабанов С.И., Багров А.В., Болгова Г.Т., Рыхлова Л.В. 1999. Угроза с неба: рок или случайность? «Космоинформ», М., 218 с.
- Моисеев Н.Н. 1988. Экология человечества глазами математика. «Молодая гвардия», М., 256 с.
- Сагдеев Р.З., Эльясберг П.Е., Мороз В.И. 1987. Оценка массы и плотности ядра кометы Галлея. Письма в АЖ, т. 13, 621–629.
- Щиголев Б.М. 1962. Математическая обработка наблюдений. Физ-Мат. ГИЗ. М., 344 с.
- Allen D.A. 1971. The method of determining infrared diameters. In Physical Studies of Minor Planets. T. Gehrels (ed), NASA SP-267, 41–44.
- Bailey, M.E. 1990. Comet craters versus asteroid craters. Preprint of Department of Astronomy, University of Manchester, 17 p.

- Bell J.F. 1988. A probable asteroid parent body for the CV or CO chondrites. *Meteoritics*, v. 23, 256–257.
- Bell J., Davis D.R., Hartmann W.K., Gaffey M.J. 1989. In *Asteroids II*, R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 921–945.
- Belyaev N.A., Kresák L., Pittich E.M., Pushkarev A.N. 1986. Catalogue of short-period comets. *Astron. Institute Slovak Acad. of Science*, Bratislava, 397 p.
- Binzel R.P. 2000. The Torino impact hazard scale. *Planetary&Space Science*, v. 48, 297–303.
- Binzel R.P., Farinella P., Zappalá and Zellino A. 1989. Asteroid rotation rates: distribution and statistics. In *Asteroids II*, R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz. 416–441.
- Binzel R.P. and Sauter L.M. 1992. Trojan, Hilda, and Cybele asteroids: new lightcurve observations and analysis. *Icarus*, v. 95, 222–238.
- Binzel R.P., Lupishko D.F., Di Martino M., Whiteley R., Hahn G.J. 2002. Physical properties of near-Earth objects. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 255–271.
- Bottke W.F., Melosh H.J. 1996. Binary asteroids and formation of doublet craters. *Icarus*, v. 124, 372–391.
- Bottke W.F., Jr., Vokrouhlický D., Rubincam D.P., and Broz M. 2002. The effect of Yarkovsky thermal forces on the dynamical evolution of asteroids and meteoroids. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 395–408.
- Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A. 1989. Application of photometric models to asteroids. In *Asteroids II*, R.P. Binzel T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz. 524–556.
- Burns J.A. and Safronov V.S. 1973. Asteroids nutation angles. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, v. 165, 403–411.
- Bus S.J. and Binzel R.P. 2002a. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. The observations. *Icarus*, v. 158, 106–145.
- Bus S.J. and Binzel R.P. 2002b. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. A feature-based taxonomy. *Icarus*, v. 158, 146–177.

- Bus S.J., Vilas F., Barucci M.A. 2002. Visible-wavelength spectroscopy of asteroids. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 169–182.
- Bykov O.P., L'vov V.N., Izmailov I.S., Sumzina N.K. 2001. Accuracy of world positional CCD observations of the numbered minor planets in 2000. In *Astrometry and Physics of Minor Planets from Observational Networks. Book of abstracts*, 18. Ceres 2001 Workshop, October 9–12, 2001. Paris.
- Chang A.F. 2002. Near Earth Asteroid Rendezvous: Mission summary. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 351–366.
- Chapman C.R. and Gaffey M.J. 1979. Reflectance spectra for 277 asteroids. In *Asteroids*, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 655–687.
- Chapman C.R. and Morrison D. 1994. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. *Nature*, v. 367, 33–40.
- Chesley S.R., Chodas P.W., Milani A., Valsecchi G.B. 2002. Quantifying the risk posed by potential Earth impacts. *Icarus*, v. 159, 423–432.
- Dollfus A. and Zellner B. 1979. Optical polarimetry of asteroids and laboratory samples. In *Asteroids*, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 170–183.
- Erikson A. and Mottola S., Lagerros J.S., and Lindgren M. 2000. The near-Earth objects follow-up program. III. 32 Lightcurves for 12 Objects from 1992 and 1995. *Icarus*, 147, 487–497.
- Farinella P., Froeschlé C., Conczi R., 1994. Meteorite delivery and transport. In *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, A. Milani, M. Di Martino and A. Cellino (eds), 205–222.
- Fernandez Y., Jewitt D. and Sheppard S. 2002. Thermal properties of Centaurs Asbolus and Chiron. *Astron. J.*, 123, 1050–1055.
- Ferraz-Mello S., Klafke J.C. 1991. A model for study of very-high-eccentricity asteroid motion. The 3:1 resonance. In *Predictability, Stability and Chaos in N-Body Dynamical Systems*, A.E.Roy (ed), 177–184.
- Ferraz-Mello S., Nesvorný D., Michtchenko T.A. 1998. On the lack of asteroids in the Hecuba gap. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, v. 69, 171–185.
- Fowler J.W. and Chillemi J.R. 1992. IRAS asteroid data processing. In *Tedesco E.F., Veeder G.J., Fowler J.W., Chillemi J.R. The IRAS Minor Planet Survey. Final Report*. Phillips Laboratory PL-TR-92-2049, Chapter 4, 17–43.

- Giorgini J.D. et al. 2002 Asteroid 1950 DA's encounter with Earth in 2880. Physical limits of collision probability prediction. *Science*, v. 296, 5 April 2002.
- Gladman B., Michel P., and Froeschlé Ch. 2000. The near-Earth object population. *Icarus*, v. 146, 176–189.
- Grieve R.A. and Shoemaker E.M. 1994. The record of past impacts on Earth. In *Hazards Due to Comets and Asteroids*, T. Gehrels and M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 417–462.
- Gaffey M.J., Bell J.F., Brown R.H. 1993. Mineralogical variations within the S-type asteroid class. *Icarus*, v. 106, 573–602.
- Harris A.W. 1994. Tumbling asteroids. *Icarus*, v. 107, 209–211.
- Harris A.W. and Lupishko D.F. 1989. Photometric lightcurve observations and reduction techniques. In *Asteroids II*, R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 39–53.
- Hudson R.S. and Ostro S.J. 1995. Shape and non-principal axis spin state of asteroid 4179 Toutatis from lightcurves and a radar-derived physical model. *Science*, v. 270, 84–86.
- Ipatov S.I., 1992. Evolution of asteroidal orbits at the 5:2 resonance. *Icarus*, v. 95, 100–114; Erratum, v. 97, 309.
- Jewitt D. 2002. From Kuiper belt object to cometary nucleus: the missing ultrared matter. *Astron. J.*, v. 123, 1039–1049.
- Johnson H.I. 1955. A photometric system. *Astron.&Astrophys.*, v. 18, 292–316.
- Kholshevnikov K.V., Shor V.A. 1995. Velocity distribution of meteoroids colliding with planets and satellites. II. Numerical results. *Astron. and Astrophys. Transact.*, v. 8, 49–58.
- Kholshevnikov K.V., Shor V.A. 1996. Velocity distribution of meteoroids in the vicinity of planets and satellites. *Earth, Moon, and Planets*, v. 72, 419–423.
- Kholshevnikov K.V., Vassiliev N.N. 1999. On the distance function between two Keplerian elliptic orbits. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*, v. 75, 75–83.
- Krasinsky G.A., Pitjeva E.V., Vasilyev M.V., Yagudina E.I. 2001. Estimating masses of asteroids. *Сообщения ИПА РАН*, № 139.

- Knežević Z., Milani A. 1994. Asteroids proper elements: the big picture. In *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, A. Milani, M. Di Martino and A. Cellino (eds), 143–158.
- Kwiatkowski T. 1994. Physical model of 1620 Geographos, a target of the Clementine space mission. In *Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies*, K. Kutzynska, F. Barlier, P.K. Seidelmann and I. Wytrzyszczak (eds), 319–322.
- Lupishko D.F., Di Martino M. 1998. Physical properties of near-Earth asteroids. *Planet. Space Sci.*, v. 46, 47–74.
- Marsden B.G. 1999. *Catalogue of Cometary Orbits*. Published by Smithsonian Center for Astrophysics.
- Matson D.L. 1971. Infrared observations of asteroids. In *Physical Studies of Minor Planets*. T. Gehrels (ed), NASA SP-267, 45–50.
- Matson D.L., Veeder G.J., Tedesco E.F., and Lebofsky L.A. The IRAS asteroid and comet survey. 1989. In *Asteroids II*, R.P Binzel T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 269–281.
- Milani A., Chesley S.R., and Valsecchi G.B. 2000. Asteroid close encounters with Earth: risk assessment. *Planet. Space Sci.*, v. 48, 945–954.
- Milani A., Chesley S.R., Chodas P.W., Valsecchi G.B. 2002. Asteroid close approaches: Analysis and potential impact detection. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 55–69.
- Millis R.L. and Dunham D.W. 1989. Precise measurement of asteroid sizes and shapes from occultations. In *Asteroids II*, R.P Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 149–170.
- Morbidelli A., Bottke W.F., Jr., Froeschlé Ch., Michel P. 2002. Origin and evolution of Near-Earth objects. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 409–422.
- MPEC (Minor Planet and Comet electronic Circular) № 8072, 2003 Feb. 13.
- Nesvorný D., Morbidelli A. 1998. Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt. *Astron.J.*, v. 116, 3029–3037.
- Öpik E.J. 1951. Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter. *Armagh Obs. Contrib.*, 6.
- Ostro S.J. 1989. Radar observations of asteroids. In *Asteroids II*, R.P Binzel T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 192–212.

- Ostro S.J. et al. 1995a. Extreme elongation of asteroid 1620 Geographos from radar images. *Nature*, v. 375. 8 June 1995.
- Ostro S.J. et al. 1995b. Radar Images of Asteroids 4179 Toutatis. *Science*, 6 October 1995, v. 270, 80–83.
- Ostro S.J. et al. 1999. Asteroid 4179 Toutatis: 1996 radar observations. *Icarus*, v. 137, 122–139.
- Ostro S.J., Hudson R.S. Benner A.M., Giorgini J.D., Magri C., Margot J.L., and Nolan M.C. 2002. Asteroid radar astronomy. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 151–168.
- Pravec P., Šaronová L., Wolf M. 1996. Lightcurves of 7 near-Earth asteroids. *Icarus*, v. 124, 471–482.
- Pravec P., Wolf M., Šaronová L. 1999. How many binaries are there among near-Earth asteroids? In *Proc. IAU Coll. 173*, J. Svoreň, E.M. Pittich, and H. Rickman (eds), *Astron. Inst. Slovak Acad. Sci.* 159–162.
- Pravec P. et al. 2000. Two-period lightcurves of 1996 FG₃, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: one probable and two possible binary asteroids. *Icarus*, v. 146, 190–203.
- Pravec P. and Harris A.W. 2000. Fast and slow rotation of asteroids. *Icarus*, v. 148, 12–20.
- Rykhlova L.V., Bagrov A.V., Barabanov S.I. Mikisha A.M., Smirnov M.A. 1998. Studies and observations of hazardous objects in near-Earth space. In *Proc. Third US/ Russian Space Surveillance Workshop*, K. Seidelmann (ed.), Washington DC, USNO, 71–85.
- Shoemaker E.M. 1983. Asteroid and comet bombardment of the earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 11, 461–491.
- Šidlichovský M., Melendo B. 1986. Mapping for 5/2 asteroidal commensurability. *Bull. Astron. Inst. Czechoslov.*, v. 37, 65–80.
- Sitarski G. 1968. Approaches of the parabolic comets to the outer planets. *Acta Astronomica*, v. 18, 171–195.
- Standish E.M. 2000. Recommendation of DE405 for the 2001 Mars Surveyor mission and for Cassini. Interoffice Memorandum, 312, F-00-107, 1–7.
- Tedesco E., Noah P.V., Noah M, Price S.D., 2002. The supplemental IRAS minor planet survey. *Astron. J.*, v. 123, 1056–1085.

- Tedesco E., Egan M.P., Price S.D., 2002. The Midcourse Space Experiment infrared minor planet survey. *Astron. J.*, v. 124, 583–591.
- Tholen D.J. 1984. Ph.D. Thesis, Univ. of Arizona.
- Tholen D.J., Barucci M.A. 1989. Asteroid taxonomy. In *Asteroids II*, R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., 298–315.
- Veeder G.J., and Tedesco E.F. 1992. Results from the IRAS Minor Planet Survey. In Tedesco E.F., Veeder G.J., Fowler J.W., Chillemi J.R. *The IRAS Minor Planet Survey. Final Report. Phillips Laboratory PL-TR-92-2049*, Chapter 7, 107–126.
- Widorn T. 1967. Zur photometrischen Bestimmung der Durchmesser der Kleinen Planeten. *Ann. Univ. Sternw. Wien*, 27, 112–119.
- Wisdom J. 1982. The origin of the Kirkwood gaps: a mapping for asteroidal motion near the 3/1 commensurability. *Astron. J.*, v. 87, 577–593.
- Wisdom J. 1983. Chaotic behaviour and the origin of the 3/1 Kirkwood gap. *Icarus*, v. 56, 51–74.
- Wisdom J. 1987. Urey Prize Lecture: Chaotic dynamics in the Solar system. *Icarus*, v. 72, 241–275.
- Yeomans D.K., Ostro S.J., and Chodas P.W. 1987. Radar astrometry of near-Earth asteroids. *Astron. J.*, v. 94, 189–200.
- Yeomans D.K. and Chodas P.W. 1994. Predicting close approaches of asteroids and comets to Earth. In *Hazards Due To Comets&Asteroids*, T. Gehrels (ed), 241–258.
- Zappalá V. and Cellino A. 1994. Asteroid Families. In *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, A. Milani, M. Di Martino and A. Cellino (eds), 395–414.
- Zappalá V., Cellino A., Dell’Oro A., and Paolicchi P. 2002. Physical and dynamical properties of asteroid families. In *Asteroids III*, W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel (eds), Univ. of Ariz., 619–631.
- Zellner B., Tholen D.J., and Tedesco E.F. 1985. The eight-color asteroid survey. Results for 589 minor planets. *Icarus*, v. 61, 355–416.

Catalogue of potentially hazardous asteroids and comets

T.A.Vinogradova, N.B.Zheleznov, V.B.Kuznetsov,
Yu.A.Chernetenko, V.A.Shor

The Catalogue has been created as a handbook for professional astronomers and experts in other related fields of knowledge. An additional objective is to outline the astronomical knowledge that is required for understanding and usage of the data included in the Catalogue.

The Catalogue contains data on 493 potentially hazardous asteroids as of 27 March, 2003 (Minimum Orbital Interseccion Distance $MOID \leq 0.05$ a.u., absolute magnitude $H \leq 22$) and on 46 periodic and near-parabolic comets with orbits approaching to that of the Earth. The data on each object embrace information (in case it is known) on its discovery circumstances, orbit, photometric parameters, rotation, albedo, diameter, color-indexes, taxonomic class, velocity of collision with the Earth and energy of collision provided it happens. Detailed description of the data is also given. Special attention is paid to a number of problems connected with the origin of NEAs, to the dynamical structure of the asteroid belt and processes of delivering the asteroid matter to the inner part of the Solar system, to the search of encounters of asteroid and comets with the Earth and to estimation of collision probability, to the description of the Torino and Palermo scales.

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды

Номер	1566	1620	1862	1981	2101	2102	2135
Имя	Icarus	Geographos	Apollo	Midas	Adonis	Tantalus	Aristaeus
Предв. обозначение	1949 MA	1951 RA	1932 HA	1973 EA	1936 CA	1975 YA	1977 HA
Дата открытия	1949 06 27	1951 09 14	1932 04 24	1973 03 06	1936 02 12	1975 12 27	1977 04 17
Обсерватория	Palomar	Palomar	Heidelberg	Palomar	Uccle	Palomar	Palomar
Число оппоз.	14	19	12	11	5	8	5
Число набл.	513+11r	834+ 7r	248+12r	99+ 1r	59+ 5r	197	23
Годы/дуга	1949–1982	1951–1994	1930–1998	1973–1999	1936–2002	1975–2001	1977–2002
Первоисточник	M08665	M25514	M32295	O38158	O31791	O14996	O33740
σ (")	0.90	0.76	0.54	0.83	1.02	0.63	0.72
a (а.е.)	1.07	1.24	1.47	1.77	1.87	1.28	1.59
e	0.826	0.335	0.560	0.649	0.764	0.298	0.503
i (°)	22.854	13.341	6.356	39.837	1.348	64.007	23.049
q (а.е.)	0.186	0.827	0.647	0.621	0.440	0.904	0.795
Q (а.е.)	1.969	1.663	2.295	2.930	3.306	1.675	2.404
MOID (а.е.)	0.0350	0.0305	0.0255	0.0035	0.0121	0.0436	0.0105
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	16.9	15.60	16.25	15.5	18.7	16.2	17.94
G	0.15	0.15	0.09	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	2.273	5.223	3.065	5.220		2.391	
Var.	0.05–0.22	1.10–2.03	0.15–0.60	0.65–0.87		0.08	
p	0.33	0.19	0.26				
U–B	0.54	0.50	0.43	0.48			
B–V	0.80	0.89	0.79	0.97			
Tax.	SU,Q	S	Q	S		Q	
D (км)	1.0	4.9×1.9×1.9	1.5	~2.2	~0.6	~1.8	~0.9
\tilde{v} (км/с)	31.11	16.34	20.61	30.47	27.20	35.32	20.86
E (Мт)	1.6·10 ⁵	7.9·10 ⁵	2.4·10 ⁵	1.7·10 ⁶	2.8·10 ⁴	1.2·10 ⁶	4.7·10 ⁴

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	2201	2340	3122	3200	3361	3362	3671
Имя	Oljato	Hathor	Florence	Phaethon	Orpheus	Khufu	Dionysus
Предв. обозначение	1947 XC	1976 UA	1981 ET3	1983 TB	1982 HR	1984 QA	1984 KD
Дата открытия	1947 12 12	1976 10 22	1981 03 02	1983 10 11	1982 04 24	1984 08 30	1984 05 27
Обсерватория	Flagstaff(LO)	Palomar	Siding Spring	(IRAS)	Cerro El Roble	Palomar	Palomar
Число оппоз.	14	6	8	18	7	14	6
Число набл.	185+ 4r	72	47	654	87	208	198
Годы/дуга	1931–2001	1976–2000	1981–1995	1983–2002	1982–1998	1984–2000	1984–2003
Первоисточник	O38158	O08362	M24720	O33740	M32296	O08362	O43316
σ (")	0.87	0.90	0.99	0.67	0.53	0.72	0.77
a (а.е.)	2.17	0.84	1.76	1.27	1.20	0.98	2.19
e	0.713	0.449	0.422	0.889	0.322	0.468	0.541
i (°)	2.516	5.854	22.175	22.169	2.683	9.918	13.545
q (а.е.)	0.622	0.464	1.021	0.139	0.819	0.525	1.007
Q (а.е.)	3.721	1.223	2.516	2.402	1.599	1.453	3.388
MOID (а.е.)	0.0016	0.0069	0.0447	0.0209	0.0138	0.0136	0.0204
Тип	Ap	At	Am	Ap	Ap	At	Ap
H	15.25	19.2	14.2	14.6	19.03	18.3	16.3
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	24.		2.358	3.604	3.58		2.705*
Var.	>0.1		0.18	0.11–0.34	0.32	>0.14	0.14–0.26
p	0.24		0.20	0.11		0.16	0.16
U–B	0.36	0.50					
B–V	0.82	0.77					
Tax.	Sq	Sq	S	B,F			Cb
D (км)	2.4	~0.5	4.3	4.8	~0.5	0.7	0.9
\tilde{v} (км/с)	23.25	17.35	17.67	35.60	14.15	18.90	15.85
E (Мт)	$1.3 \cdot 10^6$	$4.7 \cdot 10^3$	$4.2 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^7$	$4.8 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^4$	$6.9 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	3757	4015	4034	4179	4183	4450	4486
Имя		Wilson–Harrington		Toutatis	Cuno	Pan	Mithra
Предв. обозначение	1982 XB	1979 VA	1986 PA	1989 AC	1959 LM	1987 SY	1987 SB
Дата открытия	1982 12 14	1979 11 15	1986 08 02	1989 01 04	1959 06 05	1987 09 25	1987 09 22
Обсерватория	Palomar	Palomar	Palomar	Caussols	Bloemfontein	Palomar	Smolyan
Число оппоз.	4	5	8	8	13	5	10
Число набл.	84+ 2r	66	141+ 1r	836+58r	496+ 1r	78	225+17r
Годы/дуга	1982–2002	1949–1992	1986–2001	1988–2000	1959–2002	1987–1994	1974–2002
Первоисточник	O38158	M20783	O13522	O06175	O38158	M23960	O38159
σ (")	0.98	0.82	0.64	0.65	0.68	0.72	0.63
a (а.е.)	1.83	2.63	1.05	2.51	1.98	1.44	2.20
e	0.445	0.623	0.443	0.633	0.636	0.586	0.660
i (°)	3.870	2.785	11.167	0.469	6.752	5.527	3.034
q (а.е.)	1.017	0.993	0.589	0.920	0.720	0.596	0.748
Q (а.е.)	2.652	4.285	1.530	4.103	3.242	2.287	3.659
MOID (а.е.)	0.0370	0.0472	0.0189	0.0063	0.0316	0.0280	0.0457
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.95	15.99	18.1	15.30	14.4	17.2	15.6
G	0.15	0.15	0.15	0.10	0.15	0.15	0.15
P (час)	9.004	6.1		130.	3.559		days
Var.	0.20	0.2		1.1	0.1–0.84		large
p	0.34	0.05		0.13			
U–B	0.51	0.28		0.50			
B–V	0.85	0.66		0.85			
Tax.	S	CF		S,Sq	Q,Sq		
D (км)	0.4	3.8	~0.8	4.6×2.4×1.9	~4.1	~1.2	~2.6
\tilde{v} (км/с)	12.57	14.26	18.12	15.80	20.43	21.62	20.53
E (Мт)	1.7·10 ³	9.0·10 ⁵	2.9·10 ⁴	8.8·10 ⁵	4.9·10 ⁶	1.4·10 ⁵	1.2·10 ⁶

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	4581	4660	4769	4953	5011	5189	5604
Имя	Asclepius	Nereus	Castalia		Ptah		
Предв. обозначение	1989 FC	1982 DB	1989 PB	1990 MU	6743 P-L	1990 UQ	1992 FE
Дата открытия	1989 03 31	1982 02 28	1989 08 09	1990 06 23	1960 09 24	1990 10 20	1992 03 26
Обсерватория	Palomar	Palomar	Palomar	Siding Spring	Palomar	Siding Spring	Siding Spring
Число оппоз.	2	9	7	14	7	4	7
Число набл.	35	370+13r	119+14r	92+ 2r	34	23+ 1r	139+ 3r
Годы/дуга	1989–1990	1981–2002	1989–2002	1974–2001	1960–2001	1990–1996	1985–2001
Первоисточник	O03855	O38159	O38159	O38159	O14996	M26727	O13523
σ (")	0.65	0.62	0.89	0.85	0.77	0.68	0.66
a (а.е.)	1.02	1.48	1.06	1.62	1.63	1.55	0.92
e	0.356	0.360	0.483	0.657	0.499	0.477	0.405
i (°)	4.910	1.432	8.886	24.410	7.406	3.580	4.797
q (а.е.)	0.657	0.952	0.549	0.555	0.818	0.809	0.551
Q (а.е.)	1.386	2.024	1.576	2.686	2.453	2.292	1.302
MOID (а.е.)	0.0032	0.0031	0.0201	0.0276	0.0254	0.0444	0.0340
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	At
H	20.4	18.2	16.9	14.1	17.1	17.3	16.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)		15.1	4.095	14.218			
Var.		0.6	1.0	0.68			
p							
U–B							
B–V							
Tax.		C		S			
D (км)	~0.3	~1.2	~1.4	~4.7	~1.3	~1.2	~1.8
\tilde{v} (км/с)	15.48	12.74	18.80	25.88	16.84	16.96	16.41
E (Мт)	$8.7 \cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^7$	$9.8 \cdot 10^4$	$7.6 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	5693	6037	6239	6489	6491	7335	7341
Имя			Minos	Golevka			
Предв. обозначение	1993 EA	1988 EG	1989 QF	1991 JX	1991 OA	1989 JA	1991 VK
Дата открытия	1993 03 03	1988 03 12	1989 08 31	1991 05 10	1991 07 16	1989 05 01	1991 11 01
Обсерватория	Spacewatch	Palomar	Palomar	Palomar	Palomar	Palomar	Palomar
Число оппоз.	8	6	4	3	3	4	8
Число набл.	153	264+ 8r	39	681+56r	128	144+ 5r	406+ 2r
Годы/дуга	1984–1999	1988–2001	1983–1994	1991–1999	1991–1999	1989–2003	1981–2002
Первоисточник	M38748	O38159	M27892	O38159	M36059	O43316	O38160
σ (")	0.60	0.80	0.75	0.77	0.57	0.84	0.84
a (а.е.)	1.27	1.27	1.15	2.49	2.50	1.77	1.84
e	0.585	0.499	0.412	0.605	0.589	0.484	0.506
i (°)	5.055	3.494	3.944	2.277	5.732	15.214	5.419
q (а.е.)	0.527	0.636	0.676	0.986	1.028	0.913	0.909
Q (а.е.)	2.015	1.904	1.627	4.009	3.976	2.628	2.775
MOID (а.е.)	0.0053	0.0244	0.0265	0.0279	0.0484	0.0209	0.0473
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Am	Ap	Ap
H	17.0	18.7	17.9	19.2	18.5	17.0	16.7
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)		2.76		6.026	2.69		4.209
Var.	>0.13	0.2		0.28–1.03	0.08		0.28–0.70
p				0.60			
U–B							
B–V							
Tax.	Q			Q			Sq
D (км)	~1.2	~0.6	~0.9	0.35×0.25×0.25	~0.7	~1.3	~1.4
\tilde{v} (км/с)	21.88	18.62	17.10	14.76	14.22	17.49	14.71
E (Мт)	1.6·10 ⁵	1.3·10 ⁴	3.3·10 ⁴	9.9·10 ²	1.0·10 ⁴	1.2·10 ⁵	1.1·10 ⁵

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	7482	7753	7822	8014	8566	9856	10115
Имя							
Предв. обозначение	1994 PC1	1988 XB	1991 CS	1990 MF	1996 EN	1991 EE	1992 SK
Дата открытия	1994 08 09	1988 12 05	1991 02 13	1990 06 26	1996 03 15	1991 03 13	1992 09 24
Обсерватория	Siding Spring	Gekko	Siding Spring	Palomar	Haleakala/NEAT	Spacewatch	Palomar
Число оппоз.	7	5	3	2	3	6	7
Число набл.	262+ 2r	232	229+ 4r	59+16r	280	103+ 4r	214+10r
Годы/дуга	1974–2002	1988–1997	1991–2003	1990–1998	1996–1998	1991–2001	1953–1999
Первоисточник	O38160	M30258	O43316	O38160	M31511	O38160	O38160
σ (")	0.74	0.63	0.65	0.78	0.55	0.77	0.67
a (а.е.)	1.34	1.46	1.12	1.74	1.50	2.24	1.24
e	0.328	0.482	0.164	0.455	0.430	0.622	0.324
i (°)	33.491	3.122	37.122	1.862	37.962	9.769	15.322
q (а.е.)	0.904	0.760	0.937	0.950	0.857	0.848	0.843
Q (а.е.)	1.788	2.175	1.307	2.542	2.155	3.647	1.654
MOID (а.е.)	0.0004	0.0066	0.0223	0.0171	0.0220	0.0289	0.0461
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	16.8	18.6	17.4	18.7	16.5	17.4	17.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	2.599		2.389			3.045	7.320
Var.	0.29		0.27–0.32			0.14	0.70–1.01
p			0.25			0.30	
U–B							
B–V							
Tax.	S	B	S		U	S	
D (км)	~1.4	~1.0	0.9	~0.6	~1.7	1.0	~1.3
\tilde{v} (км/с)	22.64	17.50	22.41	14.22	25.65	18.95	16.53
E (Мт)	$2.2 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^4$	$6.2 \cdot 10^4$	$7.7 \cdot 10^3$	$5.2 \cdot 10^5$	$6.0 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	11500	12538	12923	13651	14827	16960	20425
Имя							
Предв. обозначение	1989 UR	1998 OH	1999 GK4	1997 BR	1986 JK	1998 QS52	1998 VD35
Дата открытия	1989 10 28	1998 07 19	1999 04 11	1997 01 20	1986 05 05	1998 08 25	1998 11 15
Обсерватория	Palomar	Haleakala/NEAT	LONEOS	Xinglong	Palomar	LINEAR	Spacewatch
Число оппоз.	4	4	4	4	4	6	3
Число набл.	175	111	305	436+ 2r	157+11r	381	49
Годы/дуга	1989–1999	1991–1999	1955–2000	1980–2000	1986–2000	1983–2002	1998–2000
Первоисточник	M35833	M36752	O04878	O38161	O38161	O33744	O07830
σ (")	0.61	0.53	0.57	0.67	0.76	0.57	0.53
a (а.е.)	1.08	1.54	1.96	1.33	2.84	2.19	1.56
e	0.355	0.406	0.491	0.305	0.664	0.859	0.476
i (°)	10.309	24.513	5.287	17.243	1.981	17.692	6.977
q (а.е.)	0.695	0.915	0.997	0.927	0.954	0.309	0.819
Q (а.е.)	1.464	2.167	2.926	1.743	4.740	4.089	2.310
MOID (а.е.)	0.0339	0.0287	0.0223	0.0141	0.0153	0.0127	0.0028
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.4	16.1	16.1	17.6	18.3	14.3	20.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	73.0		3.892	33.644			
Var.	0.46		0.18	1.2	0.05		
p							
U–B							
B–V							
Tax.	S			S	C	Sq	
D (км)	~0.7	~2.0	~2.0	~0.9	~1.2	~4.3	~0.3
\tilde{v} (км/с)	16.24	19.33	13.95	16.17	16.05	32.81	16.63
E (Мт)	$1.2 \cdot 10^4$	$5.1 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^5$	$3.7 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	22753	23187	25143	26663	27002	29075	31669
Имя							
Предв. обозначение	1998 WT	2000 PN9	1998 SF36	2000 XK47	1998 DV9	1950 DA	1999 JT6
Дата открытия	1998 11 16	2000 08 08	1998 09 26	2000 12 15	1998 02 23	1950 02 23	1999 05 12
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Mauna Kea	Mount Hamilton	LINEAR
Число оппоз.	5	4	2	4	3	4	4
Число набл.	208+ 4r	310+ 3r	627+16r	149+ 4r	136	199+13r	231
Годы/дуга	1955–2002	1990–2002	1998–2001	1974–2001	1998–2001	1950–2001	1996–2002
Первоисточник	O38163	O38163	O38163	O38164	O14523	O16171	O25669
σ (")	0.74	0.63	0.56	0.49	0.57	0.60	0.60
a (а.е.)	1.21	1.84	1.32	1.54	1.74	1.69	2.13
e	0.569	0.589	0.280	0.471	0.433	0.507	0.578
i (°)	3.207	51.311	1.623	13.547	8.687	12.184	9.563
q (а.е.)	0.524	0.757	0.953	0.816	0.988	0.836	0.899
Q (а.е.)	1.912	2.932	1.695	2.274	2.502	2.561	3.371
MOID (а.е.)	0.0334	0.0165	0.0129	0.0357	0.0033	0.0402	0.0030
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	17.7	16.1	19.2	18.2	18.2	17.0	16.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)			12.15			2.121	
Var.			1.0			0.2	
p			0.32				
U–B							
B–V							
Tax.	Q		S(IV)		Q		
D (км)	~0.9	~2.0	0.3	~0.8	~0.7	~1.3	~2.1
\tilde{v} (км/с)	21.65	33.02	12.74	17.78	13.50	17.85	16.50
E (Мт)	$5.8 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^6$	$7.4 \cdot 10^2$	$2.4 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^5$	$4.3 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	33342	35107	35396	37638	37655	38071	39572
Имя							
Предв. обозначение	1998 WT24	1991 VH	1997 XF11	1993 VB	1994 PM	1999 GU3	1993 DQ1
Дата открытия	1998 11 25	1991 11 09	1997 12 06	1993 11 06	1994 08 01	1999 04 10	1993 02 26
Обсерватория	LINEAR	Siding Spring	Spacewatch	Siding Spring	Palomar	LINEAR	Spacewatch
Число оппоз.	3	3	5	3	6	2	6
Число набл.	731+ 7r	646	480+ 5r	58	103	405+11r	97
Годы/дуга	1998–2002	1991–2003	1990–2002	1993–2002	1994–2002	1999–2002	1993–2002
Первоисточник	O38168	O43320	O38169	O26229	O26235	O38169	O27908
σ (")	0.69	0.50	0.71	0.56	0.64	0.64	0.64
a (а.е.)	0.71	1.13	1.44	1.90	1.47	2.08	2.03
e	0.418	0.143	0.483	0.519	0.752	0.506	0.492
i (°)	7.336	13.918	4.097	5.063	17.970	12.737	10.025
q (а.е.)	0.418	0.973	0.744	0.918	0.365	1.029	1.033
Q (а.е.)	1.018	1.299	2.140	2.901	2.590	3.145	3.039
MOID (а.е.)	0.0098	0.0261	0.0006	0.0001	0.0227	0.0317	0.0285
Тип	At	Ap	Ap	Ap	Ap	Am	Am
H	17.9	16.9	16.9	19.4	17.7	19.6	16.6
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	3.698	2.624*				216.	
Var.	0.3	0.08				1.4	
p	0.42						
U–B							
B–V							
Tax.	Q	Sk					
D (км)	0.5	~1.3	~1.4	~0.4	~1.0	~0.4	~1.6
\tilde{v} (км/с)	14.39	13.74	17.98	14.88	28.38	14.84	14.23
E (Мт)	$4.4 \cdot 10^3$	$7.1 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^5$	$3.2 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	41429	52760	52768	53319	53426	53429	53550
Имя							
Предв. обозначение	2000 GE2	1998 ML14	1998 OR2	1999 JM8	1999 SL5	1999 TF5	2000 BF19
Дата открытия	2000 04 03	1998 06 24	1998 07 24	1999 05 13	1999 09 28	1999 10 03	2000 01 28
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	Haleakala/NEAT	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Spacewatch
Число оппоз.	3	3	5	5	3	3	4
Число набл.	168	249+12г	72	414+ 8г	149	72	127
Годы/дуга	1998–2002	1998–2003	1987–2002	1990–2003	1999–2002	1999–2002	1991–2002
Первоисточник	O28572	O38738	O38742	O38967	O39016	O39017	O39063
σ (")	0.60	0.62	0.58	0.59	0.41	0.53	0.60
a (а.е.)	1.59	2.41	2.39	2.70	1.92	2.02	1.49
e	0.554	0.618	0.566	0.649	0.538	0.638	0.419
i (°)	2.194	2.448	5.867	13.824	22.822	26.824	7.171
q (а.е.)	0.708	0.921	1.035	0.950	0.887	0.731	0.868
Q (а.е.)	2.475	3.912	3.746	4.465	2.957	3.315	2.122
MOID (а.е.)	0.0112	0.0151	0.0332	0.0476	0.0265	0.0461	0.0457
Тип	Ap	Ap	Am	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.7	17.5	16.2	15.3	17.4	19.0	19.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)		14.98		163.			
Var.		0.12		0.7			
p							
U–B							
B–V							
Tax.		Q,S					
D (км)	~0.2	~1.0	~1.9	~2.9	~1.1	~0.5	~0.5
\tilde{v} (км/с)	19.60	16.08	13.60	17.33	20.54	25.12	15.67
E (Мт)	$9.2 \cdot 10^2$	$4.2 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^6$	$9.6 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^4$	$5.4 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер	53789	Hermes					
Имя		1937 UB	1954 XA	1978 CA	1979 XB	1983 LC	1986 JK
Предв. обозначение	2000 ED104	1937 UB	1954 XA	1978 CA	1979 XB	1983 LC	1986 JK
Дата открытия	2000 03 10	1937 10 28	1954 12 05	1978 02 08	1979 12 11	1983 06 13	1986 05 05
Обсерватория	LINEAR	Heidelberg	Palomar	ESO	Siding Spring	Palomar	Palomar
Число оппоз.	3	1	1	2	1	1	3
Число набл.	293	7	5	473	18	12	86
Годы/дуга	1955–2002	1937/4	1954/6	1978–2003	1979/4	1983/19	1986–2000
Первоисточник	O39156	M03014	O02612	O43322	M05131	M08056	M39935
σ (")	0.52	5.5	3.01	0.67	—	1.6	0.79
a (а.е.)	1.37	1.63	0.72	1.12	2.26	2.63	2.79
e	0.268	0.623	0.481	0.213	0.713	0.709	0.679
i (°)	40.792	6.220	6.992	26.060	24.865	1.512	2.139
q (а.е.)	1.002	0.617	0.376	0.882	0.648	0.765	0.896
Q (а.е.)	1.738	2.661	1.075	1.363	3.876	4.498	4.703
MOID (а.е.)	0.0484	0.0021	0.0330	0.0154	0.0239	0.0235	0.0052
Тип	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap	Ap
H	17.3	18.0	18.5	17.1	19.0	19.0	18.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)				3.756			
Var.				0.8			0.05
p							
U–B				0.14			
B–V				0.72			
Tax.				M			C
D (км)	~1.2	~0.9	~0.7	~1.5	~0.5	~0.5	~1.1
\tilde{v} (км/с)	24.67	21.52	16.40	18.65	26.34	20.73	17.66
E (Мт)	$1.6 \cdot 10^5$	$4.6 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^4$	$3.6 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^4$	$3.7 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1988 TA	1989 DA	1989 UP	1989 UQ	1989 VB	1990 HA	1990 OS
Дата открытия	1988 10 05	1989 02 27	1989 10 27	1989 10 26	1989 11 01	1990 04 17	1990 07 21
Обсерватория	Palomar	Palomar	Spacewatch	Caussols	Siding Spring	Klet	Palomar
Число оппоз.	1	1	2	5	1	2	1
Число набл.	36	18	63	110	16	38	27+ 2r
Годы/дуга	1988/63	1989/89	1989–1995	1954–2001	1989/46	1989–1990	1990/13
Первоисточник	M38021	M35680	M24894	O23417	M35681	M31784	O41516
σ (")	0.59	0.85	1.9	0.70	1.85	0.91	1.30
a (а.е.)	1.54	2.15	1.86	0.91	1.86	2.57	1.67
e	0.478	0.545	0.473	0.264	0.461	0.695	0.463
i (°)	2.539	6.484	3.865	1.291	2.136	3.906	1.112
q (а.е.)	0.803	0.982	0.981	0.672	1.005	0.781	0.902
Q (а.е.)	2.278	3.336	2.745	1.156	2.725	4.360	2.457
MOID (а.е.)	0.0064	0.0402	0.0047	0.0139	0.0169	0.0121	0.0096
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	20.8	18.6	20.5	19.4	19.9	16.0	20.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)		3.925	6.98	7.733	16.	8.55	
Var.		0.12	1.16	0.27	>0.32	>0.09	
p							
U–B							
B–V							
Tax.	C			B			
D (км)	~0.4	~0.6	~0.3	~0.7	~0.4	~2.1	~0.3
\tilde{v} (км/с)	17.08	14.16	13.14	13.46	12.90	19.69	14.90
E (Мт)	$1.2 \cdot 10^3$	$8.7 \cdot 10^3$	$5.4 \cdot 10^2$	$5.4 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$	$6.1 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1990 SM	1990 UA	1991 AQ	1991 BN	1991 DG	1991 GO	1991 JW
Дата открытия	1990 09 22	1990 10 16	1991 01 14	1991 01 19	1991 02 20	1991 04 11	1991 05 08
Обсерватория	Siding Spring	Palomar	Palomar	Spacewatch	Siding Spring	Kitami	Palomar
Число оппоз.	1	1	4	2	6	2	4
Число набл.	>10	8	79+ 8r	197	49	54	27
Годы/дуга	1990/24	1990/8	1991–2001	1991–2003	1991–2003	1991–1999	1955–1997
Первоисточник	M23225	M17218	O41516	O41516	O43323	M35062	M35683
σ (")	—	—	0.86	0.45	0.72	0.63	0.77
a (а.е.)	2.12	1.72	2.21	1.44	1.42	1.92	1.03
e	0.771	0.552	0.780	0.398	0.362	0.653	0.118
i (°)	11.530	0.967	3.192	3.447	11.149	9.558	8.721
q (а.е.)	0.485	0.769	0.486	0.868	0.909	0.668	0.915
Q (а.е.)	3.764	2.672	3.941	2.018	1.944	3.185	1.161
MOID (а.е.)	0.0206	0.0124	0.0177	0.0204	0.0385	0.0238	0.0205
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	16.5	19.5	17.2	19.3	19.3	19.8	19.3
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.		>0.1					
p							
U–B							
B–V							
Tax.			Q,U				
D (км)	~1.7	~0.4	~1.1	~0.5	~0.5	~0.4	~0.5
\tilde{v} (км/с)	27.85	18.59	27.38	15.00	15.42	21.67	12.63
E (Мт)	$6.1 \cdot 10^5$	$4.3 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^5$	$3.7 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1991 RB	1992 NA	1992 UY4	1993 BX3	1993 KH	1993 VD	1994 AW1
Дата открытия	1991 09 04	1992 07 01	1992 10 25	1993 01 31	1993 05 24	1993 11 09	1994 01 11
Обсерватория	Siding Spring	Siding Spring	Palomar	Siding Spring	Siding Spring	Spacewatch	Palomar
Число оппоз.	1	5	2	2	5	2	2
Число набл.	17	120	45	41	37	58	281
Годы/дуга	1991/23	1992–2001	1992–1996	1993–1998	1993–2001	1993–2002	1994–2002
Первоисточник	M19033	O10827	M28887	M31535	O10829	O37041	O25679
σ (")	—	0.68	0.77	0.80	0.79	0.53	0.61
a (а.е.)	1.45	2.39	2.65	1.39	1.23	0.87	1.10
e	0.483	0.560	0.619	0.280	0.311	0.551	0.075
i (°)	19.545	9.760	2.835	2.788	12.808	2.063	24.101
q (а.е.)	0.748	1.051	1.009	1.003	0.850	0.393	1.021
Q (а.е.)	2.151	3.729	4.301	1.786	1.617	1.359	1.187
MOID (а.е.)	0.0392	0.0476	0.0223	0.0477	0.0014	0.0169	0.0194
Тип	Ap	Am	Ap	Ap	Ap	At	Am
H	19.0	16.5	17.5	21.0	19.0	21.8	17.7
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)		6.992		20.463			2.519*
Var.		0.37		0.91			0.10
p							
U–B							
B–V							
Tax.		C					Sa
D (км)	~0.5	~2.7	~1.1	~0.2	~0.5	~0.1	~0.9
\tilde{v} (км/с)	20.00	14.17	14.11	11.76	15.69	20.21	16.78
E (Мт)	$1.0 \cdot 10^4$	$3.3 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^2$	$6.2 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^2$	$3.5 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1994 CC	1994 CJ1	1994 CN2	1994 EK	1994 NE	1994 RC	1994 UG
Дата открытия	1994 02 03	1994 02 10	1994 02 15	1994 03 07	1994 07 04	1994 09 01	1994 10 28
Обсерватория	Spacewatch	Spacewatch	Spacewatch	Spacewatch	Palomar	Palomar	Spacewatch
Число оппоз.	4	1	5	1	1	1	1
Число набл.	49	18	171	>10	37	70	>10
Годы/дуга	1988–2001	1994/22	1994–2002	1994/16	1994/26	1994/40	1994/4
Первоисточник	O41521	O06189	O30246	M23324	M36071	M30092	M24219
σ (")	0.47	0.51	0.53	—	1.16	0.58	—
a (а.е.)	1.63	1.48	1.57	2.14	2.03	2.26	1.22
e	0.417	0.324	0.395	0.639	0.604	0.601	0.245
i (°)	4.635	2.302	1.438	6.010	27.526	4.731	4.510
q (а.е.)	0.954	1.005	0.951	0.771	0.804	0.903	0.924
Q (а.е.)	2.319	1.971	2.194	3.515	3.267	3.630	1.527
MOID (а.е.)	0.0163	0.0313	0.0124	0.0329	0.0157	0.0418	0.0065
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.0	21.4	16.8	20.0	19.8	19.0	21.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.9	~0.2	~1.5	~0.3	~0.4	~0.5	~0.2
\tilde{v} (км/с)	14.05	12.36	13.58	19.33	23.71	16.89	13.02
E (Мт)	$2.0 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^2$	$9.7 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^3$	$4.7 \cdot 10^3$	$7.1 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1994 WR12	1994 XD	1994 XL1	1995 CR	1995 EK1	1995 SA	1995 YR1
Дата открытия	1994 11 28	1994 12 01	1994 12 06	1995 02 03	1995 03 07	1995 09 17	1995 12 20
Обсерватория	Palomar	Spacewatch	Siding Spring	Spacewatch	Oizumi	Spacewatch	Spacewatch
Число оппоз.	1	1	1	1	1	2	1
Число набл.	18	28	66	160	337	19	>10
Годы/дуга	1994/35	1994/37	1994/16	1995/20	1995/41	1991–1995	1995/30
Первоисточник	M24576	O04889	O07437	M32517	M26581	M35693	M26544
σ (")	1.0	0.68	1.23	0.95	0.60	0.58	—
a (а.е.)	0.75	2.35	0.67	0.90	2.26	2.44	1.69
e	0.405	0.729	0.526	0.869	0.776	0.647	0.826
i (°)	7.066	4.342	28.221	4.033	8.839	20.383	3.550
q (а.е.)	0.448	0.638	0.317	0.118	0.506	0.862	0.294
Q (а.е.)	1.059	4.078	1.024	1.696	4.023	4.023	3.105
MOID (а.е.)	0.0023	0.0200	0.0359	0.0131	0.0499	0.0103	0.0153
Тип	At	Ap	At	At	Ap	Ap	Ap
H	22.0	18.9	20.8	21.5	18.0	17.5	20.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)				2.42	8.444		
Var.					0.45		
p							
U–B							
B–V							
Tax.				S			
D (км)	~0.1	~0.6	~0.2	~0.2	~0.9	~1.1	~0.3
\tilde{v} (км/с)	15.04	23.67	19.27	31.86	27.44	21.27	31.26
E (Мт)	$9.0 \cdot 10^1$	$1.6 \cdot 10^4$	$7.7 \cdot 10^2$	$6.6 \cdot 10^2$	$7.5 \cdot 10^4$	$9.0 \cdot 10^4$	$3.1 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1996 AJ1	1996 AW1	1996 EO	1996 FG3	1996 FO3	1996 GT	1996 JG
Дата открытия	1996 01 12	1996 01 14	1996 03 15	1996 03 24	1996 03 24	1996 04 11	1996 05 08
Обсерватория	Spacewatch	Spacewatch	Haleakala/NEAT	Siding Spring	Siding Spring	Spacewatch	Siding Spring
Число оппоз.	1	1	1	5	1	4	1
Число набл.	>10	>10	61	338	36	119	263+ 6r
Годы/дуга	1996/16	1996/13	1996/39	1996–2001	1996/89	1996–2002	1996/20
Первоисточник	M26724	M26724	O13545	O13545	M27568	O27585	O38179
σ (")	—	—	0.67	0.58	0.48	0.60	0.70
a (а.е.)	1.30	1.52	1.34	1.05	1.44	1.64	1.80
e	0.780	0.517	0.400	0.349	0.290	0.383	0.660
i (°)	2.540	4.730	21.596	1.990	5.814	3.396	5.278
q (а.е.)	0.287	0.737	0.804	0.685	1.023	1.013	0.611
Q (а.е.)	2.329	2.316	1.878	1.422	1.861	2.270	2.991
MOID (а.е.)	0.0045	0.0415	0.0340	0.0283	0.0417	0.0400	0.0116
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Am	Ap	Ap
H	20.5	19.5	19.1	18.2	20.5	18.3	19.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)				3.595*			
Var.				0.10			
p							
U–B							
B–V				0.71			
Tax.				X			
D (км)	~0.3	~0.4	~0.5	1.4	~0.3	~0.7	~0.4
\tilde{v} (км/с)	29.34	18.44	19.11	15.73	12.11	12.40	22.96
E (Мт)	$2.7 \cdot 10^3$	$4.3 \cdot 10^3$	$8.0 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^5$	$4.6 \cdot 10^2$	$1.0 \cdot 10^4$	$6.6 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1996 JA1	1996 RG3	1996 SK	1997 AE12	1997 BQ	1997 GL3	1997 GD32
Дата открытия	1996 05 14	1996 09 14	1996 09 17	1997 01 10	1997 01 16	1997 04 07	1997 04 14
Обсерватория	Catalina	Spacewatch	Haleakala/NEAT	Spacewatch	Kiso	LINEAR	Spacewatch
Число оппоз.	1	2	2	1	3	1	1
Число набл.	347	97	89	12	160	>10	90
Годы/дуга	1996/5	1996–1997	1996–1997	1997/6	1997–2002	1997/29	1997/23
Первоисточник	M28088	M29947	M34015	M28813	O38180	M30065	M29935
σ (")	0.75	0.64	0.65	—	0.58	—	0.66
a (а.е.)	2.55	1.99	2.42	2.21	1.74	2.28	2.09
e	0.699	0.604	0.796	0.558	0.478	0.784	0.598
i (°)	22.083	3.565	1.960	5.650	11.002	6.710	5.327
q (а.е.)	0.768	0.790	0.495	0.978	0.910	0.493	0.838
Q (а.е.)	4.350	3.209	4.360	3.456	2.581	4.072	3.341
MOID (а.е.)	0.0007	0.0024	0.0034	0.0362	0.0359	0.0020	0.0181
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	21.0	18.5	17.2	17.5	18.1	20.0	21.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	5.227					7.572	
Var.	0.80					0.28	
p	0.30						
U–B							
B–V							
Tax.	V				S	V	
D (км)	0.2	~0.7	~1.2	~1.1	~0.8	~0.2	~0.2
\tilde{v} (км/с)	23.99	18.24	26.94	14.70	15.87	26.85	18.19
E (Мт)	$7.7 \cdot 10^2$	$1.7 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^5$	$4.3 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	$9.7 \cdot 10^2$	$2.6 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1997 NC1	1997 QK1	1997 US2	1997 VG6	1997 WQ23	1997 XR2	1998 BY7
Дата открытия	1997 07 05	1997 08 27	1997 10 23	1997 11 07	1997 11 29	1997 12 04	1998 01 22
Обсерватория	Haleakala/NEAT	Mauna Kea	Spacewatch	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Spacewatch
Число оппоз.	3	2	2	1	1	1	1
Число набл.	112	161	88	49	58	144	108+ 2r
Годы/дуга	1997–2001	1997–2002	1997–2000	1997/15	1997/34	1997/28	1998/30
Первоисточник	O31809	O39922	O02628	M31018	M31152	M31154	O38184
σ (")	0.58	0.65	0.58	0.57	0.56	0.75	0.57
a (а.е.)	0.86	2.79	1.67	1.60	1.73	1.07	2.02
e	0.208	0.641	0.660	0.563	0.494	0.201	0.604
i (°)	16.714	2.885	3.169	18.511	2.452	7.173	3.282
q (а.е.)	0.685	1.002	0.568	0.701	0.877	0.860	0.800
Q (а.е.)	1.046	4.588	2.780	2.515	2.595	1.293	3.247
MOID (а.е.)	0.0176	0.0100	0.0058	0.0489	0.0105	0.0001	0.0251
Тип	At	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.0	20.2	19.8	19.5	20.5	21.0	21.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.	B	SQ					
D (км)	~1.4	~0.3	~0.4	~0.4	~0.3	~0.2	~0.2
\tilde{v} (км/с)	14.27	14.46	22.96	22.03	15.82	13.30	18.63
E (Мт)	$4.2 \cdot 10^4$	$8.2 \cdot 10^2$	$4.4 \cdot 10^3$	$6.1 \cdot 10^3$	$7.9 \cdot 10^2$	$2.8 \cdot 10^2$	$2.7 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1998 BB10	1998 CS1	1998 FG2	1998 FL3	1998 FW4	1998 FH12	1998 HL1
Дата открытия	1998 01 25	1998 02 09	1998 03 21	1998 03 22	1998 03 20	1998 03 25	1998 04 18
Обсерватория	Haleakala/NEAT	Peking	Goodricke-Pigott	Spacewatch	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	2	4	t 3	1	3	2	2
Число набл.	127	79	109	26	45	45	73
Годы/дуга	1998–2000	1998–2002	1998–2001	1998/185	1994–2002	1998–1999	1998–2002
Первоисточник	O01931	O38184	O13559	O02632	O27596	O33018	O30267
σ (")	0.45	0.61	0.63	1.21	0.69	0.51	0.65
a (а.е.)	1.27	1.49	1.29	1.25	2.49	1.09	1.24
e	0.424	0.578	0.356	0.247	0.728	0.539	0.187
i (°)	11.536	7.805	4.102	26.379	3.564	3.543	20.044
q (а.е.)	0.731	0.629	0.835	0.947	0.676	0.502	1.012
Q (а.е.)	1.813	2.356	1.761	1.572	4.312	1.682	1.479
MOID (а.е.)	0.0235	0.0187	0.0221	0.0403	0.0015	0.0128	0.0416
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.4	18.2	21.6	22.0	19.9	19.1	19.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.	S						
D (км)	~0.3	~0.8	~0.2	~0.1	~0.4	~0.5	~0.5
\tilde{v} (км/с)	17.63	21.11	14.49	18.90	22.31	20.27	15.85
E (Мт)	$9.3 \cdot 10^2$	$3.4 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^2$	$1.4 \cdot 10^2$	$3.6 \cdot 10^3$	$9.0 \cdot 10^3$	$5.5 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1998 HE3	1998 HJ3	1998 HL3	1998 HD14	1998 HT31	1998 HH49	1998 KM3
Дата открытия	1998 04 21	1998 04 19	1998 04 21	1998 04 25	1998 04 29	1998 04 28	1998 05 24
Обсерватория	Goodricke-Pigott	LINEAR	LINEAR	Haleakala/NEAT	Haleakala/NEAT	Spacewatch	LINEAR
Число оппоз.	t 2	1	1	4	1	3	2
Число набл.	114	54	58	65	133	20	37
Годы/дуга	1998–2002	1998/13	1998/36	1998–2001	1998/19	1998–2000	1998–2001
Первоисточник	O24970	M31819	M32075	O16017	O07464	O08039	O12867
σ (")	0.62	0.89	0.68	0.57	0.92	0.57	0.64
a (а.е.)	0.87	1.98	1.12	0.96	2.53	1.55	1.67
e	0.440	0.743	0.366	0.313	0.695	0.502	0.611
i (°)	3.399	6.539	2.663	7.812	6.804	8.412	4.663
q (а.е.)	0.491	0.508	0.715	0.662	0.770	0.771	0.650
Q (а.е.)	1.265	3.463	1.542	1.266	4.293	2.330	2.693
MOID (а.е.)	0.0038	0.0127	0.0451	0.0330	0.0310	0.0033	0.0034
Тип	At	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	21.8	18.5	20.0	20.9	20.8	21.3	19.7
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.	SQ			SQ			
D (км)	~0.1	~0.7	~0.3	~0.2	~0.2	~0.2	~0.4
\tilde{v} (км/с)	17.04	26.44	15.85	14.81	21.01	18.37	21.29
E (Мт)	$1.2 \cdot 10^2$	$3.5 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^3$	$3.3 \cdot 10^2$	$9.2 \cdot 10^2$	$3.5 \cdot 10^2$	$4.3 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1998 KN3	1998 KJ9	1998 MZ	1998 OK1	1998 OX4	1998 QP	1998 QA1
Дата открытия	1998 05 24	1998 05 27	1998 06 18	1998 07 21	1998 07 26	1998 08 17	1998 08 19
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	Spacewatch	LINEAR	Spacewatch	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	2	1	2
Число набл.	53	154	112	20	45	188	167
Годы/дуга	1998/8	1998/14	1998/23	1998/2	1998–2002	1998/7	1998–2001
Первоисточник	M32087	M32333	O06215	M32342	O38187	M32527	O16018
σ (")	1.03	0.56	1.00	0.40	0.47	0.67	0.50
a (а.е.)	1.60	1.45	1.35	1.34	1.58	1.79	2.10
e	0.888	0.640	0.577	0.422	0.486	0.585	0.533
i (°)	2.360	10.951	0.134	13.870	4.524	9.440	8.169
q (а.е.)	0.179	0.521	0.571	0.776	0.813	0.744	0.981
Q (а.е.)	3.030	2.381	2.135	1.913	2.352	2.846	3.224
MOID (а.е.)	0.0183	0.0045	0.0014	0.0397	0.0017	0.0116	0.0030
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.5	19.5	19.3	19.5	21.0	21.5	19.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)						5.4	
Var.						0.1	
p							
U–B							
B–V							
Tax.							C
D (км)	~0.7	~0.4	~0.5	~0.4	~0.2	~0.2	~0.8
\tilde{v} (км/с)	34.48	23.90	20.92	17.60	16.52	19.57	14.97
E (Мт)	$5.9 \cdot 10^4$	$7.2 \cdot 10^3$	$7.2 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^3$	$4.3 \cdot 10^2$	$3.0 \cdot 10^2$	$1.0 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1998 QC1	1998 QE2	1998 QK28	1998 QA62	1998 SH2	1998 SU4	1998 SY14
Дата открытия	1998 08 17	1998 08 19	1998 08 25	1998 08 29	1998 09 17	1998 09 19	1998 09 21
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Spacewatch	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	2	3	1	1	1	1	1
Число набл.	90	79	132	42	48	31	68
Годы/дуга	1998–1999	1998–2002	1998/29	1998/22	1998/10	1998/4	1998/125
Первоисточник	M34020	O35448	M32762	M32769	M32777	M32778	M33757
σ (")	0.63	0.57	1.46	0.78	0.79	0.56	0.55
a (а.е.)	1.98	2.42	2.23	2.07	2.69	1.15	2.84
e	0.590	0.567	0.560	0.747	0.717	0.584	0.664
i (°)	9.628	12.784	7.702	24.926	2.478	23.404	3.518
q (а.е.)	0.811	1.049	0.982	0.524	0.760	0.480	0.954
Q (а.е.)	3.154	3.805	3.482	3.628	4.626	1.830	4.743
MOID (а.е.)	0.0184	0.0452	0.0073	0.0235	0.0109	0.0215	0.0037
Тип	Ap	Am	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	19.6	16.5	19.5	18.5	21.0	21.0	20.6
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.	C		C				
D (км)	~0.7	~1.7	~0.7	~0.7	~0.2	~0.2	~0.3
\tilde{v} (км/с)	18.48	15.13	14.62	28.24	21.22	24.62	15.16
E (Мт)	$7.7 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^3$	$4.0 \cdot 10^4$	$7.1 \cdot 10^2$	$9.6 \cdot 10^2$	$6.3 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1998 SA15	1998 SC15	1998 ST27	1998 SZ27	1998 SH36	1998 SL36	1998 SS49
Дата открытия	1998 09 21	1998 09 23	1998 09 24	1998 09 21	1998 09 27	1998 09 24	1998 09 29
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Spacewatch	LINEAR
Число оппоз.	1	2	2	1	2	1	4
Число набл.	29	81	283+ 4r	24	105	16	113
Годы/дуга	1998/181	1998–1999	1998–2001	1998/8	1998–2001	1998/5	1998–2002
Первоисточник	M34303	O31829	O38195	M32782	O12896	M32783	O33778
σ (")	0.70	0.70	0.61	0.67	0.59	0.35	0.42
a (а.е.)	1.91	1.27	0.81	0.90	1.08	1.39	1.92
e	0.558	0.414	0.530	0.503	0.570	0.419	0.639
i (°)	7.087	16.078	21.047	23.427	2.111	19.154	10.759
q (а.е.)	0.846	0.745	0.385	0.448	0.466	0.809	0.693
Q (а.е.)	2.986	1.802	1.253	1.358	1.708	1.980	3.155
MOID (а.е.)	0.0458	0.0002	0.0094	0.0082	0.0120	0.0196	0.0020
Тип	Ap	Ap	At	At	Ap	Ap	Ap
H	19.7	19.5	19.5	20.5	20.6	20.5	15.8
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)			~3.1*				
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~0.4	~0.4	~0.3	~0.3	~0.3	~2.3
\tilde{v} (км/с)	16.78	18.11	20.48	21.72	20.90	18.53	21.28
E (Мт)	$2.7 \cdot 10^3$	$4.1 \cdot 10^3$	$5.3 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^3$	$9.4 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1998 SJ70	1998 US18	1998 UT18	1998 VO	1998 VS	1998 VF32	1998 WZ1
Дата открытия	1998 09 26	1998 10 25	1998 10 27	1998 11 10	1998 11 10	1998 11 14	1998 11 16
Обсерватория	LINEAR	Spacewatch	Catalina	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	3	1	1	1	1
Число набл.	78	23	140	112	52	41	45
Годы/дуга	1998/33	1998/14	1989-2001	1998/37	1998/32	1998/10	1998/188
Первоисточник	M33115	M33372	O15036	M33574	M33574	M33378	M35079
σ (")	0.70	0.63	0.70	0.59	0.52	1.05	0.49
a (а.е.)	2.23	2.62	1.40	1.07	1.40	0.85	2.16
e	0.705	0.680	0.329	0.226	0.277	0.445	0.556
i (°)	7.435	9.662	13.593	10.053	6.824	23.962	4.307
q (а.е.)	0.658	0.838	0.942	0.830	1.011	0.472	0.959
Q (а.е.)	3.812	4.410	1.869	1.316	1.790	1.231	3.366
MOID (а.е.)	0.0337	0.0319	0.0357	0.0272	0.0409	0.0364	0.0227
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	At	Ap
H	18.5	20.4	19.1	20.4	21.9	21.1	19.9
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.			G	S			Q
D (км)	~0.7	~0.3	~0.8	~0.3	~0.1	~0.2	~0.3
\tilde{v} (км/с)	23.30	19.71	14.90	14.25	12.52	19.96	14.29
E (Мт)	$2.7 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^2$	$7.1 \cdot 10^1$	$5.5 \cdot 10^2$	$1.2 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1998 WB2	1998 WZ6	1998 XN2	1998 XX2	1998 XD12	1998 YM4	1999 AN10
Дата открытия	1998 11 18	1998 11 23	1998 12 09	1998 12 08	1998 12 14	1998 12 19	1999 01 13
Обсерватория	LINEAR	Oizumi	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Nihondaira	LINEAR
Число оппоз.	1	2	2	1	1	1	3
Число набл.	83	254	143	25	60	111	139
Годы/дуга	1998/15	1998–2001	1998–2002	1998/4	1998/10	1998/21	1955–1999
Первоисточник	M33380	O31845	O22056	M33582	M33584	M33772	O01439
σ (")	0.57	0.50	0.67	1.08	0.64	0.57	0.48
a (а.е.)	1.98	1.45	1.99	0.74	1.39	1.47	1.45
e	0.586	0.408	0.542	0.366	0.623	0.719	0.562
i (°)	2.392	24.750	1.769	6.927	13.507	3.435	39.931
q (а.е.)	0.820	0.859	0.915	0.470	0.526	0.414	0.638
Q (а.е.)	3.144	2.044	3.083	1.013	2.267	2.537	2.278
MOID (а.е.)	0.0148	0.0354	0.0086	0.0165	0.0321	0.0464	0.0003
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	21.8	17.3	19.6	20.1	20.3	19.6	17.9
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	0.313						
Var.	0.6						
p							
U–B							
B–V							
Tax.	S	V					
D (км)	~0.1	~0.7	~0.4	~0.3	~0.3	~0.4	~0.9
\tilde{v} (км/с)	17.42	19.90	15.28	13.77	23.87	26.61	28.58
E (Мт)	$1.3 \cdot 10^2$	$2.6 \cdot 10^4$	$2.6 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^3$	$7.7 \cdot 10^3$	$9.3 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1999 AQ10	1999 BJ8	1999 CF9	1999 DJ4	1999 DB7	1999 FA	1999 GL4
Дата открытия	1999 01 14	1999 01 20	1999 02 12	1999 02 24	1999 02 26	1999 03 16	1999 04 12
Обсерватория	LINEAR	Catalina	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	3	4	2	2	3	2
Число набл.	138	273	243	120	88	163	48
Годы/дуга	1999/42	1999–2002	1999–2002	1999–2000	1999–2003	1978–1999	1998–1999
Первоисточник	O01439	O38208	O38209	O08052	O41569	O03308	O25735
σ (")	0.41	0.42	0.50	0.60	0.67	0.48	0.65
a (а.е.)	0.93	1.90	1.77	1.85	1.20	1.07	2.11
e	0.234	0.548	0.599	0.482	0.195	0.132	0.603
i (°)	6.560	9.019	5.544	9.158	10.837	12.028	7.248
q (а.е.)	0.717	0.857	0.709	0.957	0.971	0.935	0.839
Q (а.е.)	1.156	2.942	2.835	2.746	1.442	1.221	3.396
MOID (а.е.)	0.0055	0.0236	0.0198	0.0228	0.0020	0.0068	0.0258
Тип	At	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.3	18.0	17.8	18.5	20.6	20.5	19.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)						10.09	
Var.						1.2	
p							
U–B							
B–V							
Tax.			Q	S		S	
D (км)	~0.3	~0.9	~0.9	~0.6	~0.3	~0.2	~0.4
\tilde{v} (км/с)	13.73	17.30	20.45	14.83	13.21	13.23	17.66
E (Мт)	$7.8 \cdot 10^2$	$3.0 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^4$	$9.0 \cdot 10^3$	$4.8 \cdot 10^2$	$4.5 \cdot 10^2$	$3.9 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1999 GS6	1999 JE1	1999 JU3	1999 JD6	1999 JV6	1999 JZ10	1999 KW4
Дата открытия	1999 04 15	1999 05 07	1999 05 10	1999 05 12	1999 05 13	1999 05 14	1999 05 20
Обсерватория	LINEAR	Catalina	LINEAR	LONEOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	2	2	2	4	4	1	4
Число набл.	101	118	50	356	181	51	1625+ 5r
Годы/дуга	1999–2002	1999–2002	1986–1999	1990–2001	1999–2002	1999/20	1999–2002
Первоисточник	O33806	O29029	O04450	O18206	O30294	M35101	O41579
σ (")	0.57	0.63	0.62	0.56	0.60	0.73	0.62
a (а.е.)	1.19	1.32	1.18	0.88	1.00	1.30	0.64
e	0.497	0.701	0.189	0.632	0.311	0.473	0.688
i (°)	2.022	20.874	5.884	17.044	5.314	25.923	38.892
q (а.е.)	0.598	0.394	0.963	0.324	0.693	0.688	0.200
Q (а.е.)	1.783	2.251	1.415	1.441	1.320	1.925	1.084
MOID (а.е.)	0.0187	0.0228	0.0003	0.0485	0.0309	0.0376	0.0133
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	At
H	19.7	19.8	19.6	17.2	19.9	21.8	16.6
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)				7.67			3.*
Var.				1.1			0.2
p							
U–B							
B–V							
Tax.		Sq	Cg	K	Xk		Q
D (км)	~0.4	~0.3	~0.7	~1.2	~0.4	~0.1	~1.6
\tilde{v} (км/с)	18.65	27.59	12.10	23.11	14.90	22.30	23.72
E (Мт)	$3.3 \cdot 10^3$	$5.2 \cdot 10^3$	$3.3 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^2$	$3.2 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1999 LT1	1999 LX1	1999 LS7	1999 MM	1999 MN	1999 NB5	1999 NC43
Дата открытия	1999 06 04	1999 06 08	1999 06 08	1999 06 20	1999 06 22	1999 07 13	1999 07 14
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LONEOS	Catalina	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	3	3	1	2	3
Число набл.	54	42	99	93	46	107	216
Годы/дуга	1999/125	1999/6	1999–2002	1999–2001	1999/25	1999–2002	1999–2001
Первоисточник	M36543	M35122	O30300	O14135	M35738	O33077	O16040
σ (")	0.68	1.00	0.60	0.71	0.62	0.67	0.47
a (а.е.)	2.97	1.16	1.00	1.62	0.67	2.07	1.75
e	0.658	0.726	0.300	0.610	0.664	0.533	0.579
i (°)	42.603	19.789	13.058	4.764	2.049	1.415	7.115
q (а.е.)	1.016	0.318	0.706	0.632	0.226	0.969	0.739
Q (а.е.)	4.934	2.009	1.313	2.615	1.122	3.189	2.779
MOID (а.е.)	0.0311	0.0242	0.0498	0.0025	0.0060	0.0141	0.0241
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap
H	17.4	20.6	21.0	19.6	21.6	21.1	16.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							Q
D (км)	~1.1	~0.3	~0.2	~0.4	~0.2	~0.2	~2.0
\tilde{v} (км/с)	28.01	27.88	15.68	21.31	18.90	14.18	19.10
E (Мт)	$1.8 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^2$	$5.0 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^2$	$2.8 \cdot 10^2$	$4.7 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1999 RR28	1999 RQ36	1999 RM45	1999 SM5	1999 SO5	1999 SG10	1999 TO13
Дата открытия	1999 09 07	1999 09 11	1999 09 14	1999 09 28	1999 09 29	1999 09 30	1999 10 12
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Catalina	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	3	2	2	1	1	1	1
Число набл.	115	209+ 4r	71	250	62	86	98
Годы/дуга	1987–2000	1999–2000	1999–2002	1999/33	1999/36	1999/17	1999/11
Первоисточник	O33817	O41580	O40021	M37302	M36924	M36570	M36575
σ (")	0.56	0.66	0.45	0.54	0.65	0.55	0.48
a (а.е.)	1.87	1.12	1.68	2.30	1.08	1.45	1.58
e	0.654	0.204	0.644	0.692	0.064	0.613	0.437
i (°)	7.124	6.024	10.887	5.171	13.367	23.582	20.306
q (а.е.)	0.648	0.897	0.597	0.706	1.014	0.561	0.892
Q (а.е.)	3.104	1.359	2.763	3.895	1.155	2.344	2.283
MOID (а.е.)	0.0153	0.0029	0.0021	0.0478	0.0142	0.0266	0.0308
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.5	20.9	19.5	19.1	21.0	20.6	21.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)		2.14		6.230			
Var.		0.22		0.77–0.96			
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.7	~0.2	~0.4	~0.5	~0.2	~0.3	~0.2
\tilde{v} (км/с)	21.73	12.70	23.40	22.00	13.24	24.63	18.82
E (Мт)	$2.4 \cdot 10^4$	$2.9 \cdot 10^2$	$6.9 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^4$	$2.8 \cdot 10^2$	$1.7 \cdot 10^3$	$3.2 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1999 TT16	1999 TF211	1999 UR	1999 VR6	1999 VP11	1999 VF22	1999 VT25
Дата открытия	1999 10 09	1999 10 15	1999 10 16	1999 11 05	1999 11 07	1999 11 10	1999 11 12
Обсерватория	Spacewatch	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Catalina	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	2	1	1
Число набл.	39	19	65	68	95	65	39
Годы/дуга	1999/24	1999/36	1999/117	1999/7	1999–2000	1999/23	1999/21
Первоисточник	M36929	O41582	M38810	M36936	O06959	O02680	M37314
σ (")	0.88	0.53	0.52	0.53	0.62	0.57	0.76
a (а.е.)	2.16	2.44	1.89	2.24	1.08	1.31	1.16
e	0.663	0.614	0.503	0.764	0.583	0.738	0.521
i (°)	2.000	39.058	3.605	8.632	17.302	3.914	5.130
q (а.е.)	0.729	0.943	0.941	0.528	0.451	0.343	0.554
Q (а.е.)	3.604	3.946	2.854	3.963	1.717	2.280	1.765
MOID (а.е.)	0.0219	0.0293	0.0146	0.0490	0.0013	0.0351	0.0476
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	19.6	15.2	21.4	21.2	18.6	20.5	21.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~3.1	~0.2	~0.2	~0.6	~0.3	~0.2
\tilde{v} (км/с)	20.15	26.87	14.13	26.06	23.60	27.75	19.81
E (Мт)	$4.4 \cdot 10^3$	$3.4 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^2$	$8.1 \cdot 10^2$	$2.4 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^3$	$3.1 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1999 XS35	1999 XK136	1999 XL136	1999 XM141	1999 XA143	1999 YD	1999 YG3
Дата открытия	1999 12 02	1999 12 10	1999 12 12	1999 12 13	1999 12 14	1999 12 17	1999 12 20
Обсерватория	LONEOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	3	1	2
Число набл.	206	100	108	38	118	99	151
Годы/дуга	1999/88	1999/36	1999/28	1999/7	1994–2001	1999/71	1999–2002
Первоисточник	M39559	M38158	M38158	M38159	O23511	O02706	O37234
σ (")	0.52	0.92	0.67	0.52	0.48	0.50	0.77
a (а.е.)	18.05	2.37	1.80	1.23	1.84	2.46	1.28
e	0.947	0.702	0.646	0.370	0.581	0.591	0.329
i (°)	19.473	2.660	8.912	21.646	38.525	1.383	34.523
q (а.е.)	0.947	0.707	0.639	0.779	0.771	1.006	0.861
Q (а.е.)	35.163	4.044	2.978	1.696	2.916	3.923	1.707
MOID (а.е.)	0.0082	0.0102	0.0027	0.0326	0.0418	0.0289	0.0417
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	17.2	20.1	19.9	19.6	16.6	21.1	19.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.						Sk	S
D (км)	~1.2	~0.3	~0.4	~0.4	~1.6	~0.2	~0.5
\tilde{v} (км/с)	21.59	21.69	22.25	18.99	27.55	13.35	23.09
E (Мт)	$1.4 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^3$	$3.6 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^3$	$5.2 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^2$	$9.6 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	1999 YR14	2000 AA6	2000 AC6	2000 AF6	2000 AZ93	2000 AF205	2000 BO28
Дата открытия	1999 12 31	2000 01 03	2000 01 04	2000 01 04	2000 01 07	2000 01 08	2000 01 30
Обсерватория	LONEOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Spacewatch
Число оппоз.	2	1	1	2	2	1	2
Число набл.	66	84	111	84	62	68	48
Годы/дуга	1999–2001	2000/10	2000/55	1991–2000	2000–2002	2000/53	1989–2000
Первоисточник	O22123	M38174	M39568	M40088	O22125	M39582	O00375
σ (")	0.78	0.48	0.50	0.57	0.69	0.57	0.51
a (а.е.)	1.65	1.28	0.85	0.87	0.74	1.03	1.69
e	0.400	0.521	0.286	0.411	0.359	0.276	0.599
i (°)	3.724	2.046	4.700	2.693	8.602	2.406	6.325
q (а.е.)	0.991	0.617	0.608	0.516	0.478	0.747	0.679
Q (а.е.)	2.316	1.961	1.097	1.239	1.015	1.320	2.716
MOID (а.е.)	0.0065	0.0074	0.0467	0.0237	0.0219	0.0179	0.0461
Тип	Ap	Ap	At	At	At	Ap	Ap
H	19.4	21.9	21.0	20.2	21.3	21.5	20.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~0.1	~0.2	~0.3	~0.2	~0.2	~0.3
\tilde{v} (км/с)	12.76	19.60	13.69	16.55	13.83	14.15	20.95
E (Мт)	$2.3 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^2$	$3.0 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^2$	$1.6 \cdot 10^2$	$2.8 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 CM33	2000 CO33	2000 CE59	2000 CH59	2000 CO101	2000 CP101	2000 CT101
Дата открытия	2000 02 02	2000 02 03	2000 02 04	2000 02 06	2000 02 08	2000 02 10	2000 02 15
Обсерватория	Catalina	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	2	1	2	1	1	1	2
Число набл.	188	68	161+ 5r	74	113	58	40
Годы/дуга	2000–2003	2000/39	2000–2000	2000/83	2000/212	2000/32	2000–2003
Первоисточник	O41599	M39591	O41600	O00707	O03927	M39601	O41602
σ (")	0.57	0.61	0.56	0.83	0.58	0.55	0.52
a (а.е.)	1.32	2.32	1.13	0.86	1.07	1.77	1.29
e	0.271	0.563	0.166	0.422	0.089	0.618	0.354
i (°)	11.552	18.201	12.264	3.273	15.326	10.465	23.291
q (а.е.)	0.962	1.016	0.948	0.497	0.979	0.675	0.838
Q (а.е.)	1.681	3.643	1.327	1.226	1.171	2.871	1.761
MOID (а.е.)	0.0425	0.0296	0.0079	0.0236	0.0219	0.0450	0.0125
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	21.3	21.1	20.4	19.4	19.3	19.2	20.7
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.2	~0.2	~0.3	~0.4	~0.5	~0.5	~0.2
\tilde{v} (км/с)	14.01	16.81	13.67	16.72	13.86	21.17	19.06
E (Мт)	$2.0 \cdot 10^2$	$3.9 \cdot 10^2$	$6.8 \cdot 10^2$	$4.0 \cdot 10^3$	$3.2 \cdot 10^3$	$8.5 \cdot 10^3$	$8.7 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 DN1	2000 DO1	2000 DK79	2000 DP107	2000 EA14	2000 ED14	2000 EE14
Дата открытия	2000 02 24	2000 02 27	2000 02 26	2000 02 29	2000 03 03	2000 03 04	2000 03 04
Обсерватория	LINEAR	Catalina	LINEAR	LINEAR	Catalina	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	2	2	1	2	3
Число набл.	73	197	39	397+10r	54	85+ 1r	170
Годы/дуга	2000/135	2000/24	2000–2002	2000–2003	2000/58	2000–2003	2000–2002
Первоисточник	O02744	O00711	O23516	O41608	O00716	O42920	O30351
σ (")	0.62	0.65	0.57	0.61	0.51	0.65	0.55
a (а.е.)	2.88	1.42	1.77	1.36	1.11	0.83	0.66
e	0.669	0.680	0.414	0.376	0.202	0.566	0.532
i (°)	7.769	3.451	60.681	8.662	3.552	13.776	26.471
q (а.е.)	0.954	0.455	1.040	0.851	0.890	0.361	0.309
Q (а.е.)	4.815	2.396	2.512	1.881	1.343	1.308	1.014
MOID (а.е.)	0.0085	0.0130	0.0496	0.0152	0.0435	0.0360	0.0229
Тип	Ap	Ap	Am	Ap	Ap	At	At
H	19.7	20.4	15.8	18.2	20.9	20.8	17.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)				2.775*			
Var.				0.19			
p							
U–B							
B–V							
Tax.				C			Q
D (км)	~0.4	~0.3	~2.3	~1.2	~0.2	~0.2	~1.2
\tilde{v} (км/с)	16.17	25.25	34.80	15.79	12.42	21.25	19.36
E (Мт)	$2.5 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^6$	$3.9 \cdot 10^4$	$2.8 \cdot 10^2$	$9.4 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 EH26	2000 EJ26	2000 EK26	2000 ET70	2000 EU70	2000 EV70	2000 EW70
Дата открытия	2000 03 04	2000 03 04	2000 03 04	2000 03 08	2000 03 08	2000 03 08	2000 03 09
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	4	1	1	1
Число набл.	47+ 6r	34	40	132	46	103	280+10r
Годы/дуга	2000/140	2000/56	2000/57	1977–2002	2000/6	2000/46	2000/16
Первоисточник	O41610	O00717	O00717	O33869	M39644	O00724	O43358
σ (")	0.54	0.52	0.70	0.58	1.23	0.54	0.65
a (а.е.)	1.85	1.38	2.40	0.94	2.20	1.20	0.93
e	0.477	0.614	0.659	0.123	0.763	0.531	0.321
i (°)	0.393	9.232	15.618	22.323	12.997	1.394	5.418
q (а.е.)	0.969	0.532	0.819	0.830	0.521	0.566	0.636
Q (а.е.)	2.736	2.232	3.992	1.063	3.889	1.850	1.238
MOID (а.е.)	0.0030	0.0066	0.0001	0.0297	0.0435	0.0119	0.0096
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	At
H	21.8	19.1	17.6	18.4	18.6	19.7	21.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.				X		Q	F
D (км)	~0.1	~0.5	~1.0	~0.7	~0.6	~0.4	~0.3
\tilde{v} (км/с)	13.94	23.24	20.32	16.20	26.61	19.70	15.18
E (Мт)	$1.0 \cdot 10^2$	$1.2 \cdot 10^4$	$7.2 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$	$3.1 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^3$	$6.5 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 EE104	2000 GF2	2000 GK137	2000 GJ147	2000 GV147	2000 HA24	2000 JE5
Дата открытия	2000 03 11	2000 04 03	2000 04 13	2000 04 13	2000 04 14	2000 04 28	2000 05 01
Обсерватория	Catalina	LINEAR	LINEAR	LONEOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	5	1	2	2	2	3	1
Число набл.	357+ 3r	58	456	104	116	111	94
Годы/дуга	1999–2003	2000/12	2000–2002	2000–2000	1993–2000	1982–2000	2000/45
Первоисточник	O43358	O07520	O25779	O07521	O04568	O01298	O02777
σ (")	0.61	0.67	0.46	0.53	0.94	0.61	0.57
a (а.е.)	1.00	1.34	1.99	1.16	1.74	1.13	1.23
e	0.293	0.379	0.506	0.236	0.455	0.318	0.400
i (°)	5.246	9.662	10.046	25.013	10.581	2.172	50.724
q (а.е.)	0.709	0.834	0.985	0.887	0.950	0.776	0.741
Q (а.е.)	1.300	1.856	3.006	1.436	2.542	1.502	1.733
MOID (а.е.)	0.0086	0.0119	0.0168	0.0254	0.0024	0.0272	0.0470
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.4	20.1	17.4	19.5	19.4	19.0	18.6
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)			3.03				
Var.			0.17				
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~0.3	~1.1	~0.4	~0.4	~0.5	~0.6
\tilde{v} (км/с)	14.82	16.17	15.10	18.54	15.43	14.31	31.20
E (Мт)	$8.0 \cdot 10^2$	$1.4 \cdot 10^3$	$5.2 \cdot 10^4$	$4.3 \cdot 10^3$	$3.4 \cdot 10^3$	$5.1 \cdot 10^3$	$4.2 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 JF5	2000 JG5	2000 KA	2000 KW43	2000 LF3	2000 LB16	2000 LY27
Дата открытия	2000 05 01	2000 05 02	2000 05 22	2000 05 29	2000 06 04	2000 06 07	2000 06 07
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LONEOS	LINEAR	LONEOS	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	2	1	1	1	1	4
Число набл.	65	234	83	58	67+ 5r	64	70
Годы/дуга	2000/5	2000–2001	2000/24	2000/17	2000/12	2000/380	1976–2002
Первоисточник	O00804	O14891	O02783	O02787	O41656	O14416	O38283
σ (")	0.52	0.55	0.66	0.65	0.82	0.68	0.62
a (а.е.)	2.05	1.34	1.33	1.45	2.58	1.24	1.30
e	0.557	0.795	0.462	0.478	0.658	0.357	0.212
i (°)	13.742	31.516	6.706	24.324	15.063	50.710	9.022
q (а.е.)	0.910	0.274	0.716	0.758	0.882	0.796	1.030
Q (а.е.)	3.204	2.407	1.950	2.149	4.290	1.684	1.587
MOID (а.е.)	0.0209	0.0265	0.0013	0.0461	0.0223	0.0039	0.0465
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Am
H	21.9	18.3	21.6	19.9	21.6	19.0	17.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)		6.055					
Var.		1.0					
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.1	~0.7	~0.2	~0.4	~0.2	~0.5	~1.3
\tilde{v} (км/с)	17.66	32.23	17.56	21.48	19.50	30.39	12.40
E (Мт)	$1.4 \cdot 10^2$	$6.8 \cdot 10^4$	$2.1 \cdot 10^2$	$3.3 \cdot 10^3$	$2.6 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^4$	$5.3 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 MU1	2000 OH	2000 OJ8	2000 OL8	2000 PD3	2000 PY5	2000 PP9
Дата открытия	2000 06 24	2000 07 21	2000 07 30	2000 07 30	2000 08 01	2000 08 02	2000 08 09
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	2	2	2	2	2	1	1
Число набл.	86	215	247	60	117	43	163
Годы/дуга	2000–2002	2000–2002	2000–2002	2000–2002	2000–2001	2000/31	2000/144
Первоисточник	O37526	O40115	O26969	O40117	O10963	O03961	O13677
σ (")	0.48	0.51	0.67	0.55	0.51	0.61	0.52
a (а.е.)	1.37	2.42	2.36	1.32	1.99	2.30	2.32
e	0.382	0.590	0.564	0.542	0.593	0.604	0.551
i (°)	13.094	18.595	6.190	10.670	7.685	3.782	5.577
q (а.е.)	0.847	0.992	1.027	0.603	0.812	0.914	1.044
Q (а.е.)	1.898	3.857	3.697	2.037	3.183	3.704	3.613
MOID (а.е.)	0.0097	0.0222	0.0373	0.0169	0.0272	0.0469	0.0450
Тип	Ap	Ap	Am	Ap	Ap	Ap	Am
H	20.0	17.7	16.8	19.6	18.4	21.1	19.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~1.0	~1.5	~0.4	~0.7	~0.2	~0.4
\tilde{v} (км/с)	16.49	17.66	13.52	20.84	18.29	16.46	13.55
E (Мт)	$1.7 \cdot 10^3$	$4.7 \cdot 10^4$	$9.6 \cdot 10^4$	$4.8 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^4$	$3.7 \cdot 10^2$	$2.6 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 QS7	2000 QV7	2000 QW7	2000 QW69	2000 QK130	2000 RS11	2000 RW37
Дата открытия	2000 08 24	2000 08 25	2000 08 26	2000 08 28	2000 08 31	2000 09 02	2000 09 03
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	Haleakala/AMOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	2	1	1	1
Число набл.	53	122	850+ 2r	127	114	73	113
Годы/дуга	2000/119	2000/25	2000/121	2000–2002	2000/114	2000/290	2000/193
Первоисточник	O08480	O04981	O41663	O33237	O08483	O15089	O12244
σ (")	0.65	0.69	0.54	0.53	0.44	0.66	0.52
a (а.е.)	2.68	1.40	1.94	1.37	1.18	1.28	1.24
e	0.662	0.523	0.468	0.301	0.261	0.321	0.250
i (°)	3.194	9.124	4.162	38.156	4.719	17.085	13.741
q (а.е.)	0.905	0.671	1.034	0.960	0.871	0.870	0.935
Q (а.е.)	4.459	2.144	2.857	1.791	1.490	1.693	1.561
MOID (а.е.)	0.0035	0.0182	0.0286	0.0248	0.0001	0.0080	0.0081
Тип	Ap	Ap	Am	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.0	21.2	19.8	17.3	21.1	18.9	20.2
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)			long?				
Var.			0.04				
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~0.2	~0.4	~1.2	~0.2	~0.6	~0.3
\tilde{v} (км/с)	16.83	19.90	12.88	24.19	13.67	16.38	14.39
E (Мт)	$1.8 \cdot 10^3$	$4.7 \cdot 10^2$	$1.4 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^2$	$7.7 \cdot 10^3$	$9.9 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 RD53	2000 SY2	2000 SP43	2000 SU180	2000 TU28	2000 UH1	2000 UG11
Дата открытия	2000 09 06	2000 09 20	2000 09 25	2000 09 27	2000 10 03	2000 10 18	2000 10 25
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	4	2	1	1	2	1
Число набл.	320+ 9r	121	179	96	33	128	393+ 4r
Годы/дуга	2000/102	1977–2002	2000–2001	2000/158	2000/30	2000–2001	2000/19
Первоисточник	O41670	O38285	O17457	O12246	O06414	O13787	O41675
σ (")	0.59	0.57	0.54	0.51	0.50	0.61	0.59
a (а.е.)	1.78	0.85	0.81	2.10	1.07	1.87	1.92
e	0.427	0.642	0.466	0.608	0.182	0.543	0.571
i (°)	9.278	19.236	10.356	11.822	15.654	14.809	8.932
q (а.е.)	1.023	0.306	0.432	0.822	0.877	0.856	0.826
Q (а.е.)	2.551	1.410	1.190	3.380	1.270	2.895	3.032
MOID (а.е.)	0.0248	0.0459	0.0186	0.0357	0.0017	0.0345	0.0081
Тип	Am	At	At	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.1	16.4	18.7	19.3	21.0	19.4	20.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	14.79						~4.4*
Var.	0.1						0.1
p							
U–B							
B–V							
Tax.							QR
D (км)	~0.3	~1.8	~0.6	~0.5	~0.2	~0.4	~0.3
\tilde{v} (км/с)	13.54	24.13	17.67	18.61	14.66	17.99	17.77
E (Мт)	$1.0 \cdot 10^3$	$5.3 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^4$	$5.7 \cdot 10^3$	$3.4 \cdot 10^2$	$4.7 \cdot 10^3$	$9.4 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 UL11	2000 WK10	2000 WO67	2000 WO107	2000 YJ11	2000 YF29	2000 YG29
Дата открытия	2000 10 25	2000 11 19	2000 11 27	2000 11 29	2000 12 19	2000 12 22	2000 12 22
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Haleakala/AMOS	LONEOS
Число оппоз.	1	2	2	3	1	2	1
Число набл.	110	40	76	171	56	156+ 3r	80
Годы/дуга	2000/28	2000–2002	2000–2002	2000–2003	2000/95	2000–2001	2000/72
Первоисточник	O07609	O30423	O25332	O41676	O13800	O41677	O13800
σ (")	0.45	0.59	0.47	0.52	0.60	0.72	0.54
a (а.е.)	2.12	1.47	2.43	0.91	1.31	1.49	3.16
e	0.634	0.702	0.618	0.780	0.230	0.371	0.696
i (°)	2.175	14.764	9.706	7.785	7.264	6.299	18.925
q (а.е.)	0.776	0.440	0.929	0.199	1.008	0.937	0.960
Q (а.е.)	3.475	2.516	3.935	1.623	1.613	2.045	5.365
MOID (а.е.)	0.0219	0.0240	0.0477	0.0034	0.0300	0.0098	0.0225
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	20.3	18.9	16.7	19.5	21.0	20.2	18.8
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~0.6	~1.5	~0.4	~0.2	~0.3	~0.6
\tilde{v} (км/с)	18.85	26.88	17.07	28.24	12.30	13.59	18.48
E (Мт)	$1.5 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^2$	$8.8 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2000 YN29	2000 YV137	2001 AD2	2001 BE10	2001 BO61	2001 CB21	2001 CV26
Дата открытия	2000 12 28	2000 12 31	2001 01 02	2001 01 18	2001 01 26	2001 02 02	2001 02 01
Обсерватория	Spacewatch	Haleakala/AMOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	3	2	3	1	3	3	2
Число набл.	51	39	79	245	71	415	71
Годы/дуга	1997–2001	2000–2003	2001–2003	2001/85	2001–2002	2001–2003	1995–2001
Первоисточник	O15094	O40125	O41677	O13805	O41677	O43396	O15095
σ (")	0.55	0.78	0.52	0.49	0.52	0.47	0.42
a (а.е.)	2.53	1.44	1.03	0.82	1.77	1.03	1.32
e	0.672	0.310	0.659	0.368	0.742	0.333	0.327
i (°)	5.444	28.009	1.652	17.505	9.085	7.911	17.981
q (а.е.)	0.830	0.998	0.353	0.519	0.457	0.689	0.888
Q (а.е.)	4.233	1.897	1.725	1.127	3.092	1.378	1.752
MOID (а.е.)	0.0150	0.0193	0.0088	0.0414	0.0127	0.0247	0.0244
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	17.6	18.3	19.8	18.9	17.9	18.6	16.3
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)						3.3	
Var.						0.19	
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~1.0	~0.7	~0.4	~0.6	~0.9	~0.7	~1.9
\tilde{v} (км/с)	18.93	19.50	24.39	16.81	27.21	15.96	16.55
E (Мт)	$6.2 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^4$	$4.9 \cdot 10^3$	$8.1 \cdot 10^3$	$8.5 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^4$	$2.9 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 DF47	2001 EC	2001 EB18	2001 FO32	2001 FA58	2001 FC58	2001 FD58
Дата открытия	2001 02 19	2001 03 03	2001 03 01	2001 03 23	2001 03 23	2001 03 23	2001 03 24
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LONEOS	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	1	3	3
Число набл.	61	249	27	120	22	132	69
Годы/дуга	2001/28	2001/55	2001/585	2001/13	2001/36	2000–2002	2000–2002
Первоисточник	O12299	O13818	O38292	O13828	O12323	O30453	O30453
σ (")	0.51	0.43	0.57	0.58	0.40	0.46	0.52
a (а.е.)	1.21	2.57	1.05	1.69	2.26	1.02	1.09
e	0.370	0.773	0.183	0.825	0.717	0.343	0.575
i (°)	18.479	0.596	50.060	38.727	8.091	6.771	6.499
q (а.е.)	0.764	0.584	0.859	0.295	0.638	0.670	0.463
Q (а.е.)	1.665	4.573	1.246	3.092	3.883	1.370	1.720
MOID (а.е.)	0.0185	0.0027	0.0289	0.0070	0.0350	0.0141	0.0330
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.4	18.6	19.3	17.8	21.8	20.6	18.8
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~0.6	~0.5	~0.9	~0.1	~0.3	~0.6
\tilde{v} (км/с)	18.06	24.86	28.37	35.80	23.94	15.39	21.46
E (Мт)	$1.2 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^2$	$6.5 \cdot 10^2$	$1.5 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 FB90	2001 FE90	2001 FM129	2001 GN2	2001 GQ2	2001 GR2	2001 GT2
Дата открытия	2001 03 21	2001 03 26	2001 03 31	2001 04 12	2001 04 14	2001 04 14	2001 04 15
Обсерватория	Haleakala/AMOS	LONEOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LONEOS
Число оппоз.	1	1	3	3	1	1	1
Число набл.	12	58	116	150	319+ 3r	38	74
Годы/дуга	2001/8	2001/121	1978–2001	1999–2002	2001/14	2001/2	2001/93
Первоисточник	O12330	O16093	O14269	O38299	O41681	O13848	O18316
σ (")	1.78	0.60	0.50	0.51	0.72	0.55	0.48
a (а.е.)	1.67	1.92	1.18	1.85	1.21	1.88	2.39
e	0.603	0.494	0.629	0.451	0.503	0.628	0.635
i (°)	1.505	8.777	1.527	26.049	21.820	11.917	3.659
q (а.е.)	0.662	0.974	0.437	1.019	0.603	0.702	0.871
Q (а.е.)	2.680	2.882	1.926	2.699	1.824	3.076	3.915
MOID (а.е.)	0.0236	0.0127	0.0098	0.0260	0.0065	0.0148	0.0451
Тип	Ap	Ap	Ap	Am	Ap	Ap	Ap
H	20.8	19.8	17.4	18.1	20.1	21.2	19.9
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.2	~0.4	~1.1	~0.8	~0.3	~0.2	~0.4
\tilde{v} (км/с)	21.09	14.93	22.91	19.33	22.36	21.87	16.87
E (Мт)	$9.3 \cdot 10^2$	$1.8 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^5$	$3.2 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^3$	$5.7 \cdot 10^2$	$2.1 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 HB	2001 HA4	2001 HY7	2001 HZ7	2001 HL31	2001 JM1	2001 JV1
Дата открытия	2001 04 16	2001 04 16	2001 04 18	2001 04 21	2001 04 29	2001 05 12	2001 05 14
Обсерватория	LONEOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Haleakala/AMOS	Palomar/NEAT
Число оппоз.	2	1	2	1	1	1	1
Число набл.	43	77	123	74	72	407	127+ 3r
Годы/дуга	1998–2001	2001/92	2001–2002	2001/28	2001/9	2001/49	2001/134
Первоисточник	O13397	O16095	O33908	O13851	O13855	O16095	O41683
σ (")	0.57	0.39	0.50	0.52	0.58	0.48	0.58
a (а.е.)	1.31	2.68	0.91	1.46	2.30	1.46	1.70
e	0.694	0.795	0.412	0.498	0.764	0.310	0.435
i (°)	9.296	17.082	5.209	5.416	12.582	17.068	6.632
q (а.е.)	0.401	0.550	0.537	0.736	0.543	1.006	0.963
Q (а.е.)	2.224	4.819	1.290	2.200	4.064	1.915	2.447
MOID (а.е.)	0.0139	0.0017	0.0358	0.0462	0.0487	0.0465	0.0220
Тип	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.5	17.6	20.5	19.7	20.3	19.0	21.3
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~1.0	~0.3	~0.4	~0.3	~0.5	~0.2
\tilde{v} (км/с)	25.38	27.33	16.28	17.61	26.84	15.37	14.20
E (Мт)	$2.0 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^5$	$8.4 \cdot 10^2$	$3.0 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^3$	$5.9 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 KO2	2001 KF54	2001 KY66	2001 KZ66	2001 KB67	2001 LD	2001 ME1
Дата открытия	2001 05 21	2001 05 26	2001 05 29	2001 05 29	2001 05 30	2001 06 02	2001 06 16
Обсерватория	Haleakala/AMOS	Spacewatch	Palomar/NEAT	Haleakala/AMOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	2	4	3	2	1	2
Число набл.	90	54	61	46	187	87	275
Годы/дуга	2001/122	2001–2001	1992–2003	1979–2002	2001–2002	2001/12	2001–2002
Первоисточник	O20840	O22777	O43397	O25898	O33912	O15103	O22778
σ (")	0.47	0.45	0.75	0.55	0.48	1.25	0.48
a (а.е.)	2.50	2.34	1.86	1.50	0.96	1.38	2.65
e	0.605	0.646	0.507	0.416	0.379	0.362	0.865
i (°)	11.961	1.598	10.632	16.678	17.139	29.537	5.775
q (а.е.)	0.989	0.829	0.918	0.879	0.597	0.885	0.357
Q (а.е.)	4.028	3.861	2.814	2.136	1.328	1.894	4.948
MOID (а.е.)	0.0308	0.0195	0.0459	0.0379	0.0139	0.0351	0.0114
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap
H	20.3	20.3	16.2	17.1	19.9	20.1	16.9
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~0.3	~1.9	~1.3	~0.4	~0.3	~1.4
\tilde{v} (км/с)	16.08	18.53	16.42	17.34	17.77	21.06	31.69
E (Мт)	$1.1 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^3$	$3.2 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^3$	$4.6 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 MG1	2001 OY13	2001 PM9	2001 PT9	2001 QC34	2001 QJ96	2001 QL142
Дата открытия	2001 06 18	2001 07 19	2001 08 11	2001 08 11	2001 08 17	2001 08 23	2001 08 24
Обсерватория	Palomar/NEAT	LONEOS	Palomar/NEAT	Haleakala/AMOS	Palomar/NEAT	LONEOS	LONEOS
Число оппоз.	2	1	2	1	1	1	3
Число набл.	94	79	117	71	111	60	44
Годы/дуга	1989–2002	2001/32	2001–2003	2001/30	2001/378	2001/7	1974–2002
Первоисточник	O25898	O16110	O43401	O18352	O35561	O18385	O38319
σ (")	0.52	0.40	0.58	0.52	0.73	0.64	0.54
a (а.е.)	2.50	1.31	1.61	1.46	1.12	1.59	1.04
e	0.640	0.381	0.415	0.455	0.187	0.798	0.498
i (°)	28.397	10.302	8.095	7.196	6.235	5.852	26.616
q (а.е.)	0.903	0.814	0.945	0.800	0.916	0.321	0.525
Q (а.е.)	4.115	1.819	2.289	2.136	1.338	2.862	1.572
MOID (а.е.)	0.0228	0.0131	0.0038	0.0281	0.0297	0.0019	0.0474
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	17.2	20.7	18.8	20.2	20.2	22.0	17.9
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~1.2	~0.2	~0.6	~0.3	~0.3	~0.1	~0.9
\tilde{v} (км/с)	22.98	16.25	14.48	17.08	12.41	29.30	23.52
E (Мт)	$1.6 \cdot 10^5$	$6.3 \cdot 10^2$	$6.9 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^3$	$7.4 \cdot 10^2$	$3.4 \cdot 10^2$	$6.3 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 QQ142	2001 RA12	2001 SQ3	2001 SG10	2001 SO73	2001 SK162	2001 SX169
Дата открытия	2001 08 25	2001 09 10	2001 09 17	2001 09 19	2001 09 19	2001 09 17	2001 09 19
Обсерватория	Haleakala/AMOS	LINEAR	LINEAR	LONEOS	Spacewatch	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	2	1	1	3	2	1
Число набл.	123	80	92	140	50	494	23
Годы/дуга	2001/270	2001–2002	2001/24	2001/63	1991–2002	1993–2002	2001/23
Первоисточник	O30460	O40464	O20979	O25955	O41732	O41735	O21023
σ (")	0.48	0.64	0.57	0.43	0.67	0.47	0.51
a (а.е.)	1.42	2.03	1.10	1.44	1.81	1.92	1.34
e	0.310	0.546	0.254	0.424	0.568	0.474	0.462
i (°)	9.316	17.084	23.896	4.251	4.861	1.682	2.518
q (а.е.)	0.979	0.923	0.827	0.833	0.784	1.012	0.724
Q (а.е.)	1.864	3.147	1.392	2.063	2.854	2.838	1.969
MOID (а.е.)	0.0114	0.0246	0.0280	0.0174	0.0465	0.0292	0.0264
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.4	17.9	21.7	20.3	18.4	18.1	17.9
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.7	~0.9	~0.2	~0.3	~0.7	~0.8	~0.9
\tilde{v} (км/с)	13.23	18.19	18.45	16.07	18.51	12.58	17.27
E (Мт)	$1.0 \cdot 10^4$	$3.8 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^4$	$3.4 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 SG262	2001 SY269	2001 SZ269	2001 SG286	2001 SN289	2001 TX1	2001 TA2
Дата открытия	2001 09 23	2001 09 25	2001 09 25	2001 09 27	2001 09 29	2001 10 10	2001 10 11
Обсерватория	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Palomar/NEAT	Palomar/NEAT	LINEAR
Число оппоз.	2	1	1	1	3	2	1
Число набл.	54	62	60	27	41	80	48
Годы/дуга	2001–2002	2001/8	2001/54	2001/55	1996–2003	2001–2002	2001/5
Первоисточник	O30469	O21044	O21044	O21048	O43430	O37737	O21049
σ (")	0.39	0.54	0.51	0.52	0.77	0.49	0.70
a (а.е.)	1.96	1.68	2.35	1.36	1.78	1.04	1.74
e	0.583	0.598	0.666	0.348	0.506	0.482	0.643
i (°)	4.812	1.865	2.470	7.752	53.264	2.797	3.237
q (а.е.)	0.817	0.675	0.786	0.887	0.879	0.541	0.624
Q (а.е.)	3.106	2.691	3.927	1.834	2.688	1.552	2.875
MOID (а.е.)	0.0312	0.0205	0.0346	0.0056	0.0157	0.0422	0.0367
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	19.0	21.2	19.3	21.1	16.6	21.0	21.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.5	~0.2	~0.5	~0.2	~1.6	~0.2	~0.2
\tilde{v} (км/с)	17.57	19.98	19.91	14.86	33.02	18.42	22.43
E (Мт)	$7.7 \cdot 10^3$	$4.8 \cdot 10^2$	$6.6 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^2$	$7.5 \cdot 10^5$	$5.4 \cdot 10^2$	$4.6 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 TX44	2001 TC45	2001 TD45	2001 TO48	2001 UY4	2001 UA5	2001 US16
Дата открытия	2001 10 11	2001 10 15	2001 10 15	2001 10 15	2001 10 16	2001 10 17	2001 10 23
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Spacewatch
Число оппоз.	1	2	2	1	2	2	1
Число набл.	55	135	36	25	131	154	29
Годы/дуга	2001/55	2001–2002	2001–2002	2001/31	2001–2003	1990–2002	2001/26
Первоисточник	O23797	O30476	O40715	O21062	O40813	O30504	O21108
σ (")	0.70	0.52	0.50	0.41	0.75	0.56	0.57
a (а.е.)	0.87	2.21	0.79	1.87	1.45	1.78	1.35
e	0.545	0.641	0.777	0.541	0.787	0.445	0.253
i (°)	15.200	15.582	25.421	6.816	5.425	9.958	1.942
q (а.е.)	0.397	0.795	0.177	0.858	0.309	0.990	1.013
Q (а.е.)	1.352	3.642	1.416	2.885	2.597	2.583	1.701
MOID (а.е.)	0.0087	0.0214	0.0266	0.0499	0.0266	0.0310	0.0285
Тип	At	Ap	At	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.9	19.3	20.2	19.5	18.5	17.5	20.6
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.6	~0.5	~0.3	~0.4	~0.7	~1.1	~0.3
\tilde{v} (км/с)	20.74	20.49	28.48	17.14	29.89	14.02	11.90
E (Мт)	$1.2 \cdot 10^4$	$6.9 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^3$	$3.7 \cdot 10^3$	$4.5 \cdot 10^4$	$3.9 \cdot 10^4$	$3.9 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 UZ16	2001 VB	2001 VC2	2001 VJ5	2001 VK5	2001 VB76	2001 WH1
Дата открытия	2001 10 25	2001 11 04	2001 11 07	2001 11 11	2001 11 11	2001 11 12	2001 11 17
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	1	1	1
Число набл.	36	53	43	22	92	98	99
Годы/дуга	2001/75	2001/8	2001/267	2001/9	2001/118	2001/218	2001/24
Первоисточник	O23849	O21144	O33944	O21145	O27779	O31958	O23929
σ (")	0.56	0.73	0.67	0.85	0.49	0.62	0.47
a (а.е.)	1.75	2.32	1.04	1.98	1.26	1.45	2.46
e	0.425	0.896	0.132	0.572	0.514	0.348	0.800
i (°)	12.699	9.479	12.513	6.179	19.436	4.239	15.570
q (а.е.)	1.009	0.240	0.903	0.847	0.616	0.950	0.492
Q (а.е.)	2.505	4.418	1.178	3.120	1.922	1.966	4.433
MOID (а.е.)	0.0298	0.0211	0.0195	0.0252	0.0001	0.0423	0.0442
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	19.4	18.4	21.0	21.2	18.0	20.7	20.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~0.7	~0.2	~0.2	~0.9	~0.2	~0.3
\tilde{v} (км/с)	14.71	34.80	13.44	17.03	22.06	13.06	28.44
E (Мт)	$3.1 \cdot 10^3$	$6.9 \cdot 10^4$	$2.9 \cdot 10^2$	$3.5 \cdot 10^2$	$4.9 \cdot 10^4$	$4.1 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 WS1	2001 WN5	2001 XU	2001 XP1	2001 XT1	2001 XU10	2001 XR30
Дата открытия	2001 11 17	2001 11 20	2001 12 07	2001 12 08	2001 12 09	2001 12 09	2001 12 11
Обсерватория	LINEAR	LONEOS	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	2	1	1	1	2	2
Число набл.	141	74	84	58	116	136	49
Годы/дуга	2001/114	2001–2003	2001/26	2001/172	2001/66	2001–2003	2001–2002
Первоисточник	O27781	O43184	O23941	O31960	O30560	O43459	O33949
σ (")	0.51	0.95	0.53	0.71	0.41	0.57	0.61
a (а.е.)	2.60	1.71	2.56	2.89	1.52	1.75	1.29
e	0.607	0.467	0.837	0.750	0.579	0.439	0.365
i (°)	13.191	1.923	19.048	39.308	2.747	42.039	11.854
q (а.е.)	1.022	0.911	0.416	0.721	0.642	0.982	0.823
Q (а.е.)	4.192	2.510	4.720	5.066	2.412	2.524	1.771
MOID (а.е.)	0.0207	0.0019	0.0001	0.0115	0.0416	0.0297	0.0209
Тип	Am	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	17.1	18.3	19.1	17.8	19.0	15.0	21.3
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~1.3	~0.7	~0.5	~0.9	~0.5	~3.4	~0.2
\tilde{v} (км/с)	15.56	15.08	31.21	30.69	20.65	26.71	16.06
E (Мт)	$8.4 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$	$2.1 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 XU30	2001 XP31	2001 XR31	2001 XN254	2001 YV3	2001 YE4	2001 YJ4
Дата открытия	2001 12 13	2001 12 11	2001 12 13	2001 12 09	2001 12 22	2001 12 21	2001 12 22
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Mauna Kea	Haleakala/AMOS	LINEAR	Haleakala/AMOS
Число оппоз.	1	1	3	2	1	1	2
Число набл.	111	14	89	488	65	62	224
Годы/дуга	2001/117	2001/9	1994–2002	1995–2002	2001/56	2001/15	1978–2002
Первоисточник	O30565	O23950	O41760	O33951	O27792	O24005	O35569
σ (")	0.60	0.24	0.62	0.47	0.70	0.61	0.62
a (а.е.)	2.19	1.14	1.70	2.31	1.94	0.67	2.27
e	0.663	0.387	0.436	0.561	0.719	0.541	0.566
i (°)	8.872	6.149	22.741	1.927	5.216	4.786	9.228
q (а.е.)	0.739	0.703	0.961	1.015	0.546	0.310	0.987
Q (а.е.)	3.655	1.592	2.452	3.622	3.347	1.042	3.564
MOID (а.е.)	0.0088	0.0115	0.0260	0.0385	0.0343	0.0316	0.0341
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	At	Ap
H	19.8	21.9	16.5	17.7	20.4	20.9	16.3
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~0.1	~1.7	~1.0	~0.3	~0.2	~1.9
\tilde{v} (км/с)	20.84	16.74	18.54	13.24	25.01	16.57	15.22
E (Мт)	$3.6 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^2$	$2.7 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^3$	$5.0 \cdot 10^2$	$2.4 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2001 YB5	2002 AV	2002 AW	2002 AY1	2002 AZ1	2002 AP3	2002 AS4
Дата открытия	2001 12 27	2002 01 05	2002 01 05	2002 01 07	2002 01 07	2002 01 06	2002 01 08
Обсерватория	Palomar/NEAT	LINEAR	Spacewatch	LINEAR	Spacewatch	Palomar/NEAT	LINEAR
Число оппоз.	1	1	3	1	1	2	1
Число набл.	396	208+ 5r	91	34+ 3r	64	49	19
Годы/дуга	2001/11	2002/39	1991–2002	2002/7	2002/35	2002–2002	2002/5
Первоисточник	O26095	O38331	O41762	O38331	O26113	O33957	O24031
σ (")	0.49	0.71	0.57	0.72	0.55	0.53	0.58
a (а.е.)	2.36	2.45	1.06	0.77	2.11	2.04	1.26
e	0.862	0.663	0.255	0.437	0.665	0.589	0.800
i (°)	5.432	2.839	0.566	29.886	8.124	7.595	26.933
q (а.е.)	0.324	0.827	0.795	0.437	0.707	0.838	0.252
Q (а.е.)	4.405	4.091	1.343	1.119	3.522	3.245	2.272
MOID (а.е.)	0.0040	0.0178	0.0046	0.0076	0.0170	0.0099	0.0382
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	20.9	20.9	21.2	20.8	22.0	20.1	22.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	2.5						
Var.	0.45						
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.2	~0.2	~0.2	~0.2	~0.1	~0.3	~0.1
\tilde{v} (км/с)	32.46	18.35	13.83	21.20	21.58	18.05	32.14
E (Мт)	$1.9 \cdot 10^3$	$6.1 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^2$	$9.4 \cdot 10^2$	$1.8 \cdot 10^2$	$1.8 \cdot 10^3$	$4.1 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 AT4	2002 AC5	2002 AC9	2002 AM31	2002 AJ129	2002 BK25	2002 BM26
Дата открытия	2002 01 08	2002 01 08	2002 01 09	2002 01 14	2002 01 15	2002 01 25	2002 02 6
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Haleakala/AMOS	Palomar/NEAT	INEAR
Число оппоз.	1	1	1	2	2	3	1
Число набл.	188	44	37	43	106	314	218+ 4r
Годы/дуга	2002/149	2002/88	2002/55	1983–2002	2002–2003	1995–2002	2002/87
Первоисточник	O31962	O30603	O30604	O25541	O43223	O38332	O38332
σ (")	0.46	0.67	0.63	0.54	0.61	0.48	0.56
a (а.е.)	1.86	1.75	1.70	1.70	1.37	2.29	1.83
e	0.447	0.493	0.560	0.451	0.914	0.748	0.444
i (°)	1.506	16.546	2.284	4.620	15.546	11.923	16.217
q (а.е.)	1.032	0.890	0.748	0.934	0.116	0.576	1.018
Q (а.е.)	2.700	2.623	2.656	2.475	2.625	4.016	2.648
MOID (а.е.)	0.0408	0.0480	0.0290	0.0318	0.0070	0.0464	0.0315
Тип	Am	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Am
H	21.4	19.7	21.0	18.8	18.7	18.1	20.1
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							~2.7*
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.2	~0.4	~0.2	~0.6	~0.6	~0.8	~0.3
\tilde{v} (км/с)	12.40	17.49	18.54	14.45	36.62	26.00	15.45
E (Мт)	$1.4 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^3$	$5.4 \cdot 10^2$	$6.9 \cdot 10^3$	$5.1 \cdot 10^4$	$5.9 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 CE	2002 CY9	2002 CZ9	2002 CQ11	2002 CU11	2002 CD14	2002 CX58
Дата открытия	2002 02 1	2002 02 6	2002 02 6	2002 02 6	2002 02 7	2002 02 7	2002 02 12
Обсерватория	INEAR	INEAR	Palomar/NEAT	INEAR	INEAR	LPL/Spacewatch II	INEAR
Число оппоз.	4	1	2	2	2	2	1
Число набл.	126	59	60	149	109	43	62
Годы/дуга	1982–2003	2002/29	2002–2002	2002–2003	2002–2003	2002–2002	2002/55
Первоисточник	O43468	O27824	O33960	O43468	O41763	O38332	O30648
σ (")	0.50	0.56	0.59	0.57	0.54	0.51	0.64
a (а.е.)	2.07	1.65	1.32	0.97	1.22	1.77	2.79
e	0.507	0.509	0.359	0.428	0.295	0.578	0.658
i (°)	43.747	41.972	4.967	2.460	48.771	2.879	2.533
q (а.е.)	1.021	0.810	0.848	0.559	0.859	0.748	0.954
Q (а.е.)	3.130	2.490	1.802	1.398	1.580	2.806	4.643
MOID (а.е.)	0.0257	0.0052	0.0252	0.0192	0.0008	0.0279	0.0337
Тип	Am	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	14.7	19.5	21.9	20.0	18.6	20.6	22.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~3.9	~0.4	~0.1	~0.3	~0.6	~0.3	~0.1
\tilde{v} (км/с)	27.64	28.18	14.98	17.35	28.68	19.38	15.39
E (Мт)	$7.3 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^2$	$1.9 \cdot 10^3$	$3.6 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^3$	$9.4 \cdot 10^1$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 DO3	2002 DU3	2002 DJ5	2002 EY2	2002 EL6	2002 EU11	2002 EV11
Дата открытия	2002 02 21	2002 02 22	2002 02 21	2002 03 06	2002 03 10	2002 03 13	2002 03 13
Обсерватория	INEAR	INEAR	LPL/Spacewatch II	Spacewatch	Drebach	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	2	2	1	2	1	1
Число набл.	79	60	33	45	332	71	46
Годы/дуга	2002/34	2002–2002	2002–2002	2002/57	2002–2002	2002/13	2002/36
Первоисточник	O30697	O38333	O38333	O31976	O41764	O30703	O30703
σ (")	0.72	0.60	0.62	0.38	0.48	0.67	0.86
a (а.е.)	1.86	1.14	1.40	1.72	2.29	2.34	2.09
e	0.498	0.238	0.567	0.486	0.579	0.680	0.891
i (°)	3.801	8.702	6.438	21.765	9.542	2.912	12.038
q (а.е.)	0.933	0.872	0.605	0.886	0.967	0.747	0.225
Q (а.е.)	2.786	1.418	2.195	2.565	3.631	3.937	3.956
MOID (а.е.)	0.0285	0.0075	0.0394	0.0002	0.0432	0.0144	0.0499
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	22.0	20.8	20.3	19.7	18.0	21.9	20.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.1	~0.2	~0.3	~0.4	~0.9	~0.1	~0.3
\tilde{v} (км/с)	14.82	13.96	21.26	19.36	15.41	20.94	34.67
E (Мт)	$8.7 \cdot 10^1$	$4.1 \cdot 10^2$	$1.9 \cdot 10^3$	$3.6 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^2$	$3.8 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 EZ11	2002 FC	2002 FB3	2002 FQ5	2002 FV5	2002 FG7	2002 GT
Дата открытия	2002 03 15	2002 03 16	2002 03 18	2002 03 20	2002 03 21	2002 03 28	2002 04 03
Обсерватория	Palomar/NEAT	LONEOS	LINEAR	LONEOS	LINEAR	Haleakala/AMOS	LPL/Spacewatch II
Число оппоз.	2	1	2	2	2	1	2
Число набл.	304	189+ 4r	92	70	196	83	233
Годы/дуга	2002–2003	2002/137	2002–2003	2002–2002	2002–2003	2002/66	2002–2003
Первоисточник	O43469	O38334	O43469	O38334	O43469	O31986	O41765
σ (")	0.67	0.64	0.66	0.61	0.57	0.53	0.60
a (а.е.)	1.11	2.83	0.76	1.91	1.08	1.51	1.34
e	0.802	0.660	0.601	0.589	0.724	0.626	0.334
i (°)	2.349	6.804	20.265	7.561	33.996	9.201	6.965
q (а.е.)	0.220	0.961	0.303	0.785	0.298	0.564	0.894
Q (а.е.)	2.007	4.703	1.219	3.043	1.874	2.462	1.794
MOID (а.е.)	0.0012	0.0223	0.0039	0.0322	0.0366	0.0423	0.0153
Тип	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.1	18.9	16.5	20.7	17.9	18.8	18.7
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.8	~0.6	~1.7	~0.2	~0.9	~0.6	~0.6
\tilde{v} (км/с)	29.66	15.95	21.75	19.33	30.63	22.42	14.39
E (Мт)	$7.6 \cdot 10^4$	$7.3 \cdot 10^3$	$3.7 \cdot 10^5$	$8.9 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^4$	$7.9 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 GM2	2002 GM5	2002 GO5	2002 GZ8	2002 HP11	2002 HK12	2002 JX8
Дата открытия	2002 04 04	2002 04 10	2002 04 11	2002 04 12	2002 04 21	2002 04 30	2002 05 04
Обсерватория	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Palomar/NEAT	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	1	3	1
Число набл.	40	20	160	92	60	522+ 1r	70
Годы/дуга	2002/65	2002/5	2002/67	2002/182	2002/23	1985–2002	2002/41
Первоисточник	O31990	O30734	O33977	O38334	O30743	O43469	O32014
σ (")	0.54	0.50	0.48	0.51	0.68	0.57	0.57
a (а.е.)	2.20	2.15	1.89	2.78	2.06	2.00	0.77
e	0.807	0.699	0.767	0.653	0.765	0.530	0.305
i (°)	3.383	7.355	13.855	5.254	5.137	2.365	4.323
q (а.е.)	0.424	0.645	0.440	0.965	0.484	0.938	0.534
Q (а.е.)	3.978	3.655	3.351	4.610	3.649	3.062	1.006
MOID (а.е.)	0.0064	0.0084	0.0353	0.0021	0.0170	0.0249	0.0197
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	At
H	18.5	21.9	17.9	18.4	20.4	18.2	20.8
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.7	~0.1	~0.9	~0.7	~0.3	~0.8	~0.2
\tilde{v} (км/с)	28.48	23.47	27.78	14.86	26.43	15.15	12.46
E (Мт)	$4.1 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^2$	$8.8 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 JZ8	2002 JB9	2002 JE9	2002 JQ9	2002 JV15	2002 KG4	2002 KJ4
Дата открытия	2002 05 05	2002 05 06	2002 05 06	2002 05 06	2002 05 08	2002 05 22	2002 05 22
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	2	1	1	2	1	1
Число набл.	148	287	71	159	163	182	67
Годы/дуга	2002/65	2002–2002	2002/83	2002/57	2002–2002	2002/31	2002/89
Первоисточник	O33996	O41765	O33996	O33996	O41765	O32034	O35578
σ (")	0.45	0.49	0.59	0.50	0.49	0.74	0.49
a (а.е.)	2.74	2.71	1.06	1.15	1.62	2.93	2.26
e	0.645	0.785	0.416	0.394	0.536	0.662	0.558
i (°)	9.768	46.723	8.826	25.001	7.167	27.587	27.835
q (а.е.)	0.974	0.583	0.622	0.700	0.752	0.992	1.000
Q (а.е.)	4.515	4.851	1.512	1.613	2.495	4.884	3.534
MOID (а.е.)	0.0005	0.0321	0.0051	0.0490	0.0388	0.0340	0.0185
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	21.7	16.0	21.4	19.3	19.4	20.9	19.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.2	~2.1	~0.2	~0.5	~0.4	~0.2	~0.4
\tilde{v} (км/с)	15.69	35.46	17.21	20.26	18.85	21.75	21.01
E (Мт)	$1.5 \cdot 10^2$	$2.0 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^2$	$6.8 \cdot 10^3$	$5.1 \cdot 10^3$	$8.6 \cdot 10^2$	$5.5 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 KK8	2002 LV	2002 LX	2002 LY1	2002 LT38	2002 LY45	2002 MX
Дата открытия	2002 05 30	2002 06 01	2002 06 03	2002 06 03	2002 06 12	2002 06 14	2002 06 17
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	1	3	1
Число набл.	97	546	73	59	48	261	31
Годы/дуга	2002/63	2002/254	2002/33	2002/12	2002/39	2000–2003	2002/19
Первоисточник	O34010	O43469	O34011	O34011	O34016	O43469	O34019
σ (")	0.60	0.48	0.52	0.53	0.50	0.53	0.47
a (а.е.)	1.95	2.31	2.51	0.95	0.84	1.64	2.50
e	0.464	0.602	0.672	0.379	0.314	0.886	0.796
i (°)	24.503	29.662	3.238	2.910	6.197	9.998	1.958
q (а.е.)	1.045	0.922	0.823	0.592	0.579	0.187	0.510
Q (а.е.)	2.859	3.711	4.198	1.316	1.110	3.096	4.496
MOID (а.е.)	0.0318	0.0134	0.0384	0.0115	0.0342	0.0024	0.0149
Тип	Am	Ap	Ap	At	At	Ap	Ap
H	21.0	16.6	21.1	22.0	20.4	16.9	21.7
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)	?n*						
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.2	~1.6	~0.2	~0.1	~0.3	~1.4	~0.2
\tilde{v} (км/с)	18.62	22.98	18.70	15.93	13.65	34.37	26.87
E (Мт)	$5.5 \cdot 10^2$	$3.6 \cdot 10^5$	$4.8 \cdot 10^2$	$1.0 \cdot 10^2$	$6.7 \cdot 10^2$	$5.4 \cdot 10^5$	$4.3 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 MR3	2002 MT3	2002 NN4	2002 NT7	2002 NV16	2002 NY40	2002 OD20
Дата открытия	2002 06 30	2002 06 30	2002 07 09	2002 07 09	2002 07 13	2002 07 14	2002 07 21
Обсерватория	LINEAR	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	Palomar/NEAT
Число оппоз.	1	1	1	3	1	1	1
Число набл.	78	61	116	307	221	2522+ 9r	42
Годы/дуга	2002/8	2002/31	2002/59	1954–2003	2002/181	2002/142	2002/292
Первоисточник	O34019	O34019	O35582	O43469	O41767	O41767	O35595
σ (")	0.62	0.59	0.54	0.52	0.53	0.75	0.38
a (а.е.)	1.50	2.80	0.87	1.73	1.23	2.04	1.36
e	0.620	0.689	0.434	0.529	0.220	0.710	0.368
i (°)	9.786	6.508	5.417	42.317	3.506	5.891	4.175
q (а.е.)	0.571	0.872	0.495	0.816	0.965	0.592	0.861
Q (а.е.)	2.444	4.741	1.257	2.653	1.510	3.503	1.866
MOID (а.е.)	0.0432	0.0350	0.0070	0.0015	0.0283	0.0031	0.0265
Тип	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap	Ap
H	21.4	19.9	20.1	16.6	21.5	19.3	18.6
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.2	~0.4	~0.3	~1.6	~0.2	~0.5	~0.6
\tilde{v} (км/с)	22.53	18.02	16.47	28.50	12.10	23.72	14.57
E (Мт)	$4.6 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$	$5.6 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^2$	$9.3 \cdot 10^3$	$9.2 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 OA22	2002 PR1	2002 PM6	2002 PZ39	2002 PD43	2002 PF43	2002 PE130
Дата открытия	2002 07 30	2002 08 04	2002 08 06	2002 08 10	2002 08 07	2002 08 10	2002 08 14
Обсерватория	Palomar/NEAT	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	1	1	2	2	1	1	1
Число набл.	32	99	306	313	95	34	103
Годы/дуга	2002/38	2002/88	2001–2002	1995–2002	2002/22	2002/119	2002/152
Первоисточник	O35595	O38346	O35243	O38348	O35603	O41769	O41773
σ (")	0.55	0.71	0.50	0.51	0.56	0.45	0.66
a (а.е.)	0.93	2.49	1.19	1.46	2.51	1.64	2.56
e	0.243	0.588	0.850	0.546	0.955	0.366	0.615
i (°)	6.913	6.695	19.232	1.663	26.259	13.862	15.619
q (а.е.)	0.708	1.024	0.179	0.666	0.111	1.041	0.985
Q (а.е.)	1.163	3.957	2.216	2.273	4.912	2.245	4.144
MOID (а.е.)	0.0353	0.0368	0.0368	0.0031	0.0321	0.0341	0.0381
Тип	At	Am	Ap	Ap	Ap	Am	Ap
H	19.2	21.9	17.8	19.0	19.0	20.9	18.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.5	~0.1	~0.9	~0.5	~0.5	~0.2	~0.7
\tilde{v} (км/с)	13.30	14.15	32.78	19.80	40.90	14.35	17.07
E (Мт)	$3.4 \cdot 10^3$	$9.1 \cdot 10^1$	$1.4 \cdot 10^5$	$9.8 \cdot 10^3$	$4.2 \cdot 10^4$	$3.7 \cdot 10^2$	$1.5 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 QC7	2002 QF15	2002 QQ40	2002 QW47	2002 RW25	2002 SM	2002 SZ
Дата открытия	2002 08 19	2002 08 27	2002 08 30	2002 08 30	2002 09 05	2002 09 16	2002 09 26
Обсерватория	Palomar/NEAT	LINEAR	Palomar/NEAT	Palomar/NEAT	LINEAR	Palomar/NEAT	Palomar/NEAT
Число оппоз.	1	4	1	1	1	1	1
Число набл.	66	103	57	20	71	38	80
Годы/дуга	2002/72	1955–2002	2002/10	2002/31	2002/90	2002/80	2002/33
Первоисточник	O38366	O37793	O35630	O38373	O41777	O41791	O38418
σ (")	0.57	0.51	0.84	0.55	0.41	0.54	0.52
a (а.е.)	1.16	1.05	1.22	1.96	0.82	1.87	1.29
e	0.195	0.344	0.570	0.516	0.286	0.485	0.433
i (°)	26.811	25.152	1.743	4.213	1.324	14.433	22.893
q (а.е.)	0.940	0.693	0.525	0.951	0.589	0.963	0.735
Q (а.е.)	1.397	1.421	1.919	2.986	1.061	2.780	1.860
MOID (а.е.)	0.0491	0.0064	0.0284	0.0046	0.0161	0.0244	0.0016
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap
H	19.8	16.5	21.0	20.1	18.8	17.2	20.4
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~1.7	~0.2	~0.3	~0.6	~1.2	~0.3
\tilde{v} (км/с)	18.85	19.59	20.76	14.94	12.81	16.41	20.86
E (Мт)	$2.9 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^5$	$6.8 \cdot 10^2$	$1.2 \cdot 10^3$	$5.4 \cdot 10^3$	$8.1 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^3$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 SQ41	2002 SR41	2002 SY50	2002 TW55	2002 TD66	2002 TP69	2002 TB70
Дата открытия	2002 09 29	2002 09 30	2002 09 30	2002 10 02	2002 10 05	2002 10 09	2002 10 10
Обсерватория	Haleakala/AMOS	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	LONEOS	Palomar/NEAT
Число оппоз.	1	1	1	1	1	1	1
Число набл.	68	49	522+ 7r	46	77	150	44
Годы/дуга	2002/22	2002/31	2002/71	2002/57	2002/159	2002/92	2002/54
Первоисточник	O38430	O38430	O38434	O41806	O43473	O43473	O41808
σ (")	0.46	0.59	0.53	0.54	0.45	0.57	0.57
a (а.е.)	2.60	1.08	1.70	2.11	1.85	1.94	1.13
e	0.802	0.490	0.689	0.663	0.534	0.469	0.132
i (°)	25.128	11.599	8.745	59.408	4.919	1.966	16.651
q (а.е.)	0.514	0.551	0.529	0.712	0.863	1.033	0.983
Q (а.е.)	4.691	1.614	2.882	3.523	2.845	2.858	1.283
MOID (а.е.)	0.0036	0.0358	0.0022	0.0254	0.0058	0.0497	0.0152
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Am	Ap
H	20.1	20.1	17.7	18.2	20.2	22.0	21.7
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~0.3	~1.0	~0.8	~0.3	~0.1	~0.2
\tilde{v} (км/с)	29.62	19.51	24.28	37.56	16.12	12.47	14.48
E (Мт)	$4.8 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^3$	$8.9 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^3$	$6.2 \cdot 10^1$	$1.3 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 TR190	2002 UQ3	2002 UK11	2002 VE68	2002 VP69	2002 VR85	2002 VU94
Дата открытия	2002 10 12	2002 10 29	2002 10 29	2002 11 11	2002 11 11	2002 11 12	2002 11 13
Обсерватория	LINEAR	Fountain Hills	Palomar/NEAT	LONEOS	LINEAR	LINEAR	Palomar/NEAT
Число оппоз.	1	1	1	1	1	1	4
Число набл.	46	194	56	197+ 5r	196	55	54
Годы/дуга	2002/77	2002/159	2002/14	2002/24	2002/145	2002/25	1955–2003
Первоисточник	O41821	O43476	O38502	O41861	O43477	O41864	O41247
σ (")	0.44	0.47	0.45	0.62	0.47	0.65	0.60
a (а.е.)	1.07	1.71	1.32	0.72	2.01	1.81	2.13
e	0.160	0.561	0.574	0.410	0.529	0.602	0.573
i (°)	26.916	28.808	5.366	8.982	10.185	5.987	8.936
q (а.е.)	0.904	0.753	0.561	0.426	0.947	0.721	0.909
Q (а.е.)	1.249	2.685	2.081	1.020	3.085	2.903	3.360
MOID (а.е.)	0.0049	0.0395	0.0116	0.0264	0.0309	0.0250	0.0288
Тип	Ap	Ap	Ap	At	Ap	Ap	Ap
H	19.7	17.7	21.7	20.3	18.2	20.4	15.5
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~1.0	~0.2	~0.3	~0.8	~0.3	~2.7
\tilde{v} (км/с)	18.35	23.80	21.04	14.16	14.94	19.67	16.77
E (Мт)	$3.2 \cdot 10^3$	$8.5 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^2$	$8.3 \cdot 10^2$	$1.7 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^3$	$8.9 \cdot 10^5$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2002 VX94	2002 WQ4	2002 XR14	2002 YP2	2003 AY2	2003 AA3	2003 AC23
Дата открытия	2002 11 14	2002 11 24	2002 12 05	2002 12 28	2003 01 02	2003 01 03	2003 01 07
Обсерватория	Palomar/NEAT	Palomar/NEAT	LINEAR	LINEAR	LONEOS	LINEAR	LINEAR
Число оппоз.	3	1	1	1	1	1	1
Число набл.	50	58	148	85	65	275	72
Годы/дуга	1986–2003	2002/41	2002/89	2002/41	2003/15	2003/50	2003/21
Первоисточник	O41247	O41874	O43479	O41899	O41906	O43484	O41910
σ (")	0.56	0.50	0.59	0.40	0.58	0.52	0.49
a (а.е.)	1.47	1.95	1.90	1.57	1.82	1.42	2.14
e	0.408	0.555	0.625	0.688	0.565	0.289	0.580
i (°)	7.166	3.958	2.130	20.610	10.314	13.785	2.049
q (а.е.)	0.873	0.870	0.713	0.491	0.793	1.009	0.899
Q (а.е.)	2.079	3.047	3.096	2.665	2.854	1.833	3.391
MOID (а.е.)	0.0332	0.0185	0.0110	0.0225	0.0223	0.0318	0.0057
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	18.1	19.7	18.4	19.1	20.0	20.3	21.9
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.8	~0.4	~0.7	~0.5	~0.3	~0.3	~0.1
\tilde{v} (км/с)	15.06	16.28	20.32	26.95	18.92	14.01	15.93
E (Мт)	$2.0 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^3$	$8.2 \cdot 10^2$	$1.2 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2003 AD23	2003 AF23	2003 BH	2003 BB21	2003 BD44	2003 BK47	2003 BR47
Дата открытия	2003 01 07	2003 01 08	2003 01 18	2003 01 27	2003 01 30	2003 01 30	2003 01 31
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	Haleakala/AMOS	LINEAR	LONEOS	LPL/Spacewatch II	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	3	1	1
Число набл.	38	120	93	74	92	50	154
Годы/дуга	2003/19	2003/46	2003/51	2003/30	1981–2003	2003/31	2003/34
Первоисточник	O41910	O43486	O43491	O43495	O43273	O43498	O43498
σ (")	0.57	0.52	0.47	0.58	0.53	0.53	0.56
a (а.е.)	1.64	0.87	1.45	2.22	1.96	2.75	1.62
e	0.762	0.426	0.355	0.556	0.604	0.702	0.499
i (°)	23.413	23.239	13.108	4.846	2.665	21.002	4.417
q (а.е.)	0.391	0.502	0.937	0.987	0.777	0.820	0.813
Q (а.е.)	2.898	1.247	1.973	3.466	3.157	4.690	2.441
MOID (а.е.)	0.0363	0.0329	0.0287	0.0218	0.0176	0.0176	0.0081
Тип	Ap	At	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	19.4	20.7	20.5	21.0	16.8	18.5	21.3
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.4	~0.2	~0.3	~0.2	~1.5	~0.7	~0.2
\tilde{v} (км/с)	30.10	19.94	15.03	14.20	19.29	22.38	16.64
E (Мт)	$1.3 \cdot 10^4$	$9.5 \cdot 10^2$	$7.1 \cdot 10^2$	$3.2 \cdot 10^2$	$1.9 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^4$	$2.9 \cdot 10^2$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2003 CC	2003 CR1	2003 CG11	2003 CR20	2003 DX10	2003 EE16	2003 EG16
Дата открытия	2003 02 01	2003 02 02	2003 02 04	2003 02 11	2003 02 26	2003 03 08	2003 03 08
Обсерватория	LPL/Spacewatch II	LINEAR	LONEOS	Haleakala/AMOS	LINEAR	LPL/Spacewatch II	LINEAR
Число оппоз.	1	1	1	1	1	1	1
Число набл.	75	43	61	165	129	51	55
Годы/дуга	2003/39	2003/39	2003/27	2003/28	2003/16	2003/6	2003/6
Первоисточник	O43504	O43505	O43507	O43509	O43511	O43517	O43517
σ (")	0.47	0.50	0.48	0.50	0.46	0.55	0.59
a (а.е.)	1.50	1.45	2.58	2.12	1.37	1.43	2.41
e	0.326	0.463	0.737	0.731	0.411	0.627	0.687
i (°)	2.323	12.712	21.271	4.987	3.152	0.658	20.317
q (а.е.)	1.010	0.780	0.680	0.569	0.810	0.532	0.754
Q (а.е.)	1.990	2.126	4.496	3.673	1.943	2.328	4.073
MOID (а.е.)	0.0361	0.0277	0.0211	0.0008	0.0449	0.0000	0.0121
Тип	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap
H	20.6	19.9	20.5	18.7	20.4	19.9	19.0
G	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P (час)							
Var.							
p							
U–B							
B–V							
Tax.							
D (км)	~0.3	~0.4	~0.3	~0.6	~0.3	~0.4	~0.5
\tilde{v} (км/с)	12.30	17.91	25.62	25.18	15.99	22.58	23.61
E (Мт)	$4.2 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^4$	$9.3 \cdot 10^2$	$3.7 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^4$

Таблица 1. Потенциально опасные астероиды (продолжение)

Номер Имя Предв. обозначение	2003 ED50	2003 EF54	6344 P-L
Дата открытия	2003 03 11	2003 03 12	1960
Обсерватория	LINEAR	LINEAR	Palomar
Число оппоз.	1	1	1
Число набл.	73	33	4
Годы/дуга	2003/4	2003/3	1960/4
Первоисточник	O43521	O43522	ICA 59
σ (")	0.58	0.43	—
a (а.е.)	1.42	1.62	2.61
e	0.548	0.477	0.641
i (°)	33.831	2.974	4.643
q (а.е.)	0.641	0.849	0.939
Q (а.е.)	2.199	2.398	4.297
MOID (а.е.)	0.0256	0.0415	0.0279
Тип	Ap	Ap	Ap
H	20.9	19.7	21.6
G	0.15	0.15	0.15
P (час)			
Var.			
p			
U-V			
B-V			
Tax.			
D (км)	~0.2	~0.4	~0.2
\tilde{v} (км/с)	26.58	16.30	15.62
E (Мт)	$1.3 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^2$

Пояснения к таблице 1

Обсерватория	указывается обсерватория или программа наблюдений.
Число наблюдений	указывается число оптических позиционных наблюдений; число радиолокационных наблюдений, если они есть, указывается после оптических и отмечено буквой 'r'.
Первоисточник	указывается либо номер Minor Planet Circular (первая буква M), либо номер Minor Planet Orbit Supplement (первая буква O); оба издания публикуются Центром малых планет (США, Кембридж).
σ (")	средняя квадратическая ошибка представления наблюдений (§14).
a	большая полуось орбиты, выраженная в астрономических единицах (а.е.).
e	эксцентриситет орбиты.
i	наклон орбиты к плоскости эклиптики.
q	перигельное расстояние (в а.е.).
Q	афельное расстояние (в а.е.).
MOID	минимальное расстояние между орбитами астероида и Земли (Minimum Orbital Intersection Distance) в а.е. (§11).
Тип	указывается принадлежность малой планеты к одному из трех типов: Am – тип Амура, Ap – тип Аполлона, At – тип Атона (§3).
H	абсолютная звездная величина малой планеты в лучах V (§5).
G	параметр наклона (§5).
P	период вращения планеты (период колебаний кривой блеска, связанный с осевым вращением), указан в часах (§8); звездочкой отмечены значения периода колебания блеска для астероидов, являющихся двойными или предположительно двойными; указанный период соответствует периоду вращения главного компонента.
Var	наблюденная амплитуда колебания блеска или предельные по величине амплитуды колебаний блеска, наблюдавшихся в разных оппозициях (§8).
p_V	геометрическое альbedo в визуальных лучах (§5).
U-V	цвет-индекс (разность блеска малой планеты в ультрафиолетовых и синих лучах) (§9).
B-V	цвет-индекс (разность блеска малой планеты в синих и визуальных лучах) (§9).
Tax	таксономический тип (класс) малой планеты по классификации Толена (§10) или в соответствии с иными таксономиями; приводится в том виде, как он дан в оригинальной работе.
D	диаметр малой планеты (в км) (§6,13); знак ~ перед величиной диаметра означает, что это значение вычислено на основе абсолютной звездной величины без знания точного значения альbedo астероида; при этом использовались значения альbedo, рекомендованные в §13; если знак ~ отсутствует, это означает, что диаметр вычислен по формуле (13.1), (§13) при значении альbedo, указанном для данного астероида, или найден иным способом, дающим достаточно точное значение диаметра; для некоторых астероидов указаны размеры осей эллипсоидальной модели.
\tilde{v}	геоцентрическая скорость малой планеты с учетом притяжения Земли (в км/с) (§12).
E	кинетическая энергия малой планеты относительно Земли, выраженная в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента (§13).

Таблица 2. Сближения потенциально опасных астероидов с Землей в ближайшие годы

Астероид	JD	Дата	V	Δ_{min} (а.е.)	Δ_{min} (млн.км)	Склонение		Угол фазы	Элонгация	
						-5дн	+5дн			
37655	2002 CQ ₁₁	2452651.316	2003 1 11.8	16.77	0.04566	6.830	- 4	+38	102	75
	1994 PM	2452868.092	2003 8 16.6	12.57	0.02504	3.745	- 6	-20	81	97
	2000 GF ₂	2452900.849	2003 9 18.3	15.46	0.03450	5.160	+11	-21	76	103
	1999 TO ₁₃	2452918.102	2003 10 5.6	15.46	0.03025	4.525	-68	+16	41	138
	1998 FG ₂	2452933.939	2003 10 21.4	17.11	0.03780	5.654	+48	+57	75	103
	1996 GT	2452956.474	2003 11 13.0	13.39	0.04802	7.183	-37	-10	42	136
25143	2001 SY ₂₆₉	2453082.819	2004 3 18.3	16.41	0.02676	4.004	-23	-26	88	91
	2001 US ₁₆	2453133.775	2004 5 8.3	15.28	0.02860	4.279	+39	+45	67	112
	1998 SF ₃₆	2453183.332	2004 6 26.8	13.39	0.01290	1.929	- 3	-63	100	80
	1999 MN	2453197.562	2004 7 11.1	15.55	0.01737	2.599	-29	-14	77	102
4179	Toutatis	2453278.067	2004 9 29.6	10.03	0.01036	1.549	-26	- 6	117	62
	1992 UY ₄	2453590.885	2005 8 8.4	12.41	0.04038	6.041	-10	+28	47	131
	1999 RQ ₃₆	2453633.941	2005 9 20.4	16.52	0.03318	4.963	- 4	+27	86	92
	1999 TO ₁₃	2453648.866	2005 10 5.4	15.50	0.03092	4.625	-74	+15	41	138
23187	2000 PN ₉	2453800.683	2006 3 6.2	12.93	0.02034	3.043	-56	+79	138	41
	2001 CB ₂₁	2454010.950	2006 10 2.5	15.82	0.04787	7.161	+ 2	+26	106	71
	2001 YE ₄	2454103.460	2007 1 3.0	16.40	0.03768	5.637	+60	+37	75	102
	1999 TO ₁₃	2454379.868	2007 10 6.4	15.73	0.03286	4.915	-81	+11	44	135
4450	Pan	2454516.431	2008 2 19.9	13.09	0.04082	6.107	+ 3	-27	81	96
	2002 TD ₆₆	2454522.100	2008 2 25.6	15.51	0.03705	5.542	+25	+13	70	108
35107	2002 AZ ₁	2454655.791	2008 7 8.3	16.81	0.02314	3.462	+53	-12	84	94
	1991 VH	2454694.041	2008 8 15.5	15.49	0.04577	6.847	+12	-32	126	52
	2000 UG ₁₁	2454779.973	2008 11 9.5	12.94	0.00910	1.361	+20	-46	79	100

Примечания. Указаны сближения до минимальных расстояний, не превышающих 0.05 а.е. В графе V указывается видимая звездная величина в момент наибольшего сближения. В графе “Склонение” указано склонение астероида за пять дней до наибольшего сближения и через пять дней после наибольшего сближения. Угол фазы и элонгация планеты дается на момент наибольшего сближения.

Таблица 3. Потенциально опасные кометы

Номер/Имя Предв. обозначение	Helfenzrieder D/1766 G1	Lexell D/1770 L1	Blanpain D/1819 W1	3D/Biela 1832 S1	15P/Finlay 1893 K1
Дата открытия	1766 04 01	1770 06 14	1819 11 27	1772 03 08	1886 09 26
Обсерватория	Swabia	Paris	Marseilles	Limoges	Cape Town
Число появлений	1	1	1	6	13
Число наблюдений	22	130	7	26	60
Годы/дуга	1766 – 1766	1770 – 1770	1819 – 1820	1832 – 1852	1967 – 2002
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	MPC 44862
Период (годы)	4.35	5.60	5.10	6.62	6.75
Группа/семейство	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера
e	0.848	0.786	0.699	0.756	0.711
i (°)	7.865	1.552	9.108	12.549	3.674
q (а.е.)	0.406	0.674	0.892	0.861	1.034
Q (а.е.)	4.923	5.632	5.032	6.188	6.110
MOID (а.е.)	0.1290	0.0142	0.0656	0.0065	0.0498
H_1	6.8 ⁴⁾	7.7 ⁴⁾	8.5 ⁴⁾	7.1 ¹⁾	9.4 ¹⁾
P (час)					
p					
D (км)					0.9
\tilde{v} (км/с)	30.31	23.75	16.71	20.00	14.80
E (Мт)					$1.1 \cdot 10^4$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	21P/Giacobini-Zinner 1913 U1	26P/Grigg-Skjellerup 1927 F1	41P/Tuttle-Giacobini-Kresák 1951 H1	45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková 1954 C1	46P/Wirtanen 1954 R2
Дата открытия	1900 12 20	1808 02 06	1858 05 03	1948 12 03	1948 01 17
Обсерватория	Nice	Marseilles	Harvard Observatory, USA	Kurashiki Observatory	Lick Observatory
Число появлений	13	18	9	10	9
Число наблюдений	1011	173	84	149	252
Годы/дуга	1978 – 1991	1961 – 1992	1989 – 2000	1990 – 2001	1995 – 2002
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	MPC 41717	MPC 42548	MPC 45964
Период (годы)	6.61	5.11	5.43	5.25	5.44
Группа/семейство	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера
e	0.706	0.664	0.659	0.825	0.658
i (°)	31.859	21.087	9.225	4.256	11.738
q (а.е.)	1.034	0.997	1.052	0.528	1.059
Q (а.е.)	6.010	4.933	5.124	5.513	5.130
MOID (а.е.)	0.0390	0.0078	0.1384	0.0599	0.0749
H_1	9.2 ¹⁾	11.6 ¹⁾	10.6 ¹⁾	11.0 ¹⁾	8.4 ¹⁾
P (час)					7.6 ²⁾
p					
D (км)	1.0	1.3	0.7	0.5	1.16 ²⁾
\tilde{v} (км/с)	23.72	18.76	16.11	27.10	15.80
E (Мт)	3.9·10 ⁴	5.3·10 ⁴	6.1·10 ³	6.3·10 ³	2.7·10 ⁴

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	72P/Denning-Fujikawa 1978 T2	Haneda-Campos D/1978 R1	73P/Schwassmann-Wachmann 3 1979 P1	103P/Hartley 2 1991 N1	141P/Machholz 2 1999 P1
Дата открытия	1881 10 04	1978 09 01	1930 05 02	1986 03 15	1994 08 13
Обсерватория	Bristol	Haranomachi, Durban	Hamburg-Bergedorf	Siding Spring Observ.	Colfax, California
Число появлений	2	1	5	3	2
Число наблюдений	28	55	229	377	207
Годы/дуга	1881 – 1978	1978 – 1978	1989 – 2000	1986 – 1998	1994 – 1999
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	MPC 39024	MPC 42666	MPC 35815
Период (годы)	9.01	5.97	5.36	6.40	5.22
Группа/семейство	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера
e	0.820	0.665	0.694	0.700	0.751
i (°)	8.644	5.946	11.406	13.602	12.812
q (а.е.)	0.780	1.101	0.937	1.036	0.7495
Q (а.е.)	7.877	5.479	5.186	5.861	5.268
MOID (а.е.)	0.0746	0.1358	0.0411	0.0447	0.1078
H_1	12.6 ¹⁾	13.5 ⁷⁾	10.8 ¹⁾	7.4 ¹⁾	
P (час)					
p					
D (км)			1.0	3.8	
\tilde{v} (км/с)	21.60	15.05	16.85	16.57	21.22
E (Мт)			1.9·10 ⁴	1.0·10 ⁶	

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	LINEAR P/2000 G1	NEAT P/2001 J1	Petrew P/2001 Q2	LONEOS P/2001 WF2	8P/Tuttle 1871 T1
Дата открытия	2000 04 07	2001 05 11	2001 08 18	2001 11 17	1790 01 09
Обсерватория	Lincoln Lab., NEAR	Haleakala-AMOS	Cyprus Hills	Lowell Obs., LONEOS	Paris
Число появлений	1	1	1	1	11
Число наблюдений	135	51	399	104	49
Годы/дуга	2000 – 2000	2000 – 2001	2001 – 2001	2001 – 2002	1980 – 1992
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999
Период (годы)	5.36	7.64	5.49	5.01	13.5
Группа/семейство	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Юпитера	семейство Сатурна
e	0.672	0.758	0.696	0.667	0.824
i (°)	10.374	10.160	13.944	13.944	54.692
q (а.е.)	1.003	0.937	0.946	0.976	0.998
Q (а.е.)	5.119	6.818	5.281	4.883	10.346
MOID (а.е.)	0.0192	0.1452	0.0471	0.1075	0.0625
H_1					7.5 ¹⁾
P (час)					
p					
D (км)					
\tilde{v} (км/с)	15.70	18.52	16.46	19.34	48.27
E (Мг)					

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	85P/Boethin 1985 T2	55P/Tempel-Tuttle 1997 E1	Mellish C/1917 F1	1P/Halley 1982 U1	Levy C/1991 L3
Дата открытия	1975 01 04	1366 10 25	1917 03 19	-239 05 24	1991 06 14
Обсерватория	Abra, the Philippines	China	Lactonia	China	Tucson, AZ
Число появлений	2	5	1	30	1
Число наблюдений	44	160	170	7469	81
Годы/дуга	1975 – 1986	1866 – 1998	1917 – 1917	1835 – 1989	1991 – 1993
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999
Период (годы)	11.2	33.2	145.0	76.0	51.3
Группа/семейство	семейство Сатурна	семейство Урана	семейство Нептуна	семейство Нептуна	семейство Нептуна
e	0.778	0.906	0.993	0.967	0.929
i (°)	5.756	162.486	32.683	162.242	19.190
q (а.е.)	1.114	0.977	0.190	0.587	0.983
Q (а.е.)	8.912	19.698	55.105	35.296	26.619
MOID (а.е.)	0.0411	0.0075	0.0615	0.0653	0.0761
H_1	7.8 ¹⁾	7.7 ¹⁾	7.3 ⁴⁾	2.8 ¹⁾	
P (час)				53	8.34 ²⁾
p				0.03	
D (км)				16*8*8 ³⁾	16.4 ²⁾
\tilde{v} (км/с)	15.49	71.59	42.77	67.32	21.88
E (Мт)				3.2*10 ⁸	1.4*10 ⁸

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	109P/Swift-Tuttle 1992 S2	BATTERS C/2001 W2	5D/Brorsen C/1846 J1	Schweizer C/1853 G1	Thatcher C/1861 G1
Дата открытия	-68 08 20	2001 11 21	1846 05 02	1853 04 05	1861 04 04
Обсерватория	China	Bisei Spaceguard Center	Kiel	Москва	New York
Число появлений	5	1	1	1	1
Число наблюдений	446	331	170	80	187
Годы/дуга	1862 – 1992	1998 – 1998	1846 – 1846	1853 – 1853	1861 – 1861
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999
Период (годы)	135.0	75.0	538.0	781.0	415.0
Группа/семейство	семейство Нептуна	семейство Нептуна	долгопериод.	долгопериод.	долгопериод.
e	0.964	0.987	0.990	0.989	0.983
i (°)	113.426	115.913	150.681	122.196	79.773
q (а.е.)	0.958	0.964	0.638	0.909	0.921
Q (а.е.)	51.675	34.511	131.593	168.719	110.443
MOID (а.е.)	0.0011	0.1458	0.0487	0.0712	0.0014
H_1	3.7 ¹⁾		7.2 ⁴⁾	6 ⁴⁾	5.5 ⁴⁾
P (час)					
p					
D (км)					
\tilde{v} (км/с)	54.49	55.21	67.85	54.89	51.68
E (Мг)					

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	Great comet C/1861 J1	Brooks C/1885 R1	Gale C/1894 G1	Giacobini C/1905 F1	Peltier-Whipple C/1932 P1
Дата открытия	1861 05 13	1885 08 31	1894 04 01	1905 03 25	1932 08 06
Обсерватория	Windsor, New South Wales	Phelps NY, USA	Sydney	Nice	Harvard Obs.
Число появлений	1	1	1	1	1
Число наблюдений	1156	80	500	172	132
Годы/дуга	1861 – 1862	1885 – 1885	1894 – 1894	1905 – 1905	1932 – 1932
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999
Период (годы)	409.0	275.0	958.0	226.0	291.0
Группа/семейство	долгопериод.	долгопериод.	долгопериод.	долгопериод.	долгопериод.
e	0.985	0.982	0.990	0.970	0.976
i (°)	85.442	59.097	86.967	40.199	71.720
q (а.е.)	0.822	0.749	0.983	1.115	1.037
Q (а.е.)	109.342	83.729	193.369	73.098	86.746
MOID (а.е.)	0.130	0.1271	0.0778	0.1247	0.1460
H_1	3.9 ⁴⁾	9.5 ⁴⁾	6.3 ⁴⁾	11.5 ⁴⁾	8.1 ⁴⁾
P (час)					
p					
D (км)					
\tilde{v} (км/с)	50.33	39.82	51.32	29.46	44.75
E (Мт)					

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	Johnson C/1935 A1	Friend-Reese-Honda C/1941 B1	Seki C/1961 T1	Ikeya C/1964 N1	Suzuki-Saigusa-Mori C/1975 T2
Дата открытия	1935 01 07	1941 01 16	1961 10 10	1964 07 03	1975 10 05
Обсерватория	Johannesburg	Escondido, CA	Kochi, Japan	Tokyo	Aichi, Yamanashi, Gifu
Число появлений	1	1	1	1	1
Число наблюдений	182	29	56	38	82
Годы/дуга	1935 – 1935	1941 – 1941	1961 – 1961	1964 – 1964	1975 – 1976
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999
Период (годы)	901.0	355.0	759.0	391.0	446.0
Группа/семейство	долгопериод.	долгопериод.	долгопериод.	долгопериод.	долгопериод.
e	0.991	0.981	0.981	0.985	0.986
i (°)	65.425	26.276	155.711	171.920	118.233
q (а.е.)	0.811	0.942	0.992	0.822	0.838
Q (а.е.)	185.745	99.369	165.691	106.198	115.987
MOID (а.е.)	0.1490	0.0969	0.0839	0.0411	0.0992
H_1	10.0 ⁴⁾	12.0 ⁴⁾	9.3 ⁵⁾	5.9 ⁵⁾	3.7 ⁶⁾
P (час)					
p					
D (км)					
\tilde{v} (км/с)	42.27	26.08	69.34	69.90	55.98
E (Мг)					

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 3. Потенциально опасные кометы (продолжение)

Номер/Имя Предв. обозначение	Bradfield C/1979 Y1	LINEAR C/1998 K5	Tempel C/1864 N1	IRAS-Araki-Alcock C/1983 H1	Hale-Bopp C/1995 O1	Hyakutake C/1996 B2
Дата открытия	1979 12 24	1998 05 26	1864 07 05	1983 04 25	1995 07 23	1996 01 30
Обсерватория	Dornancourt, near Adelaide	Lincoln Lab., NEAR	Marseilles, France	Infrared Astr. Satellite	Cloudcroft, NM	Japan
Число появлений	1	1	1	1	1	1
Число наблюдений	122	547	206	90	3000	703
Годы/дуга	1979 – 1980	1998 – 1998	1864 – 1864	1983 – 1983	1995 – 2003	1996 – 1996
Первоисточник	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999	Marsden, 1999
Период (годы)	291.0	616				
Группа/семейство	долгопериод.	долгопериод.	почтипарабол.	почтипарабол.	почтипарабол.	почтипарабол.
e	0.988	0.987	0.996	0.990	0.995	0.9997
i (°)	148.602	9.927	178.127	73.253	89.430	124.923
q (а.е.)	0.545	0.964	0.909	0.991	0.914	0.230
Q (а.е.)	87.370	143.876	497.469	199.583	369.785	1902.463
MOID (а.е.)	0.0667	0.1371	0.0053	0.0047	0.1119	0.1011
H_1			6.2 ⁴⁾		– 2.0 ⁸⁾	5.5 ⁸⁾
P (час)					11.47 ²⁾	
p						
D (км)					45.0 ²⁾	
\tilde{v} (км/с)	66.23	20.21	71.64	52.01	53.29	58.75
E (Мт)					1.8·10 ¹⁰	

Пояснения к таблице 3

Номер/Имя	для периодических комет, наблюдавшихся более чем в одном появлении, указывается последовательный номер в списке таких комет, поддерживаемом Центром малых планет. За номером следуют символы P/или D/, причем буква P соответствует периодической комете с периодом менее 200 лет, а D – периодической комете, которая разрушилась или считается утерянной. В случае, если комета не имеет последовательного номера (наблюдалась только в одном появлении или номер пока еще не присвоен), в данной строке указывается только имя кометы.
Предв. обозначение	для периодических комет, имеющих последовательный номер, в данной строке дается предварительное обозначение в последнем появлении кометы. В случае, если комета не имеет номера, в данной строке указывается ее предварительное обозначение, которому предшествует один из символов C/, P/или D/, причем буква P соответствует комете, наблюдавшейся в нескольких появлениях или наблюдавшейся только в одном появлении, но с орбитальным периодом менее 30 лет; C соответствует непериодическим кометам либо периодическим, но наблюдавшимся только в одном появлении и имеющим орбитальный период больше 30 лет; буква D соответствует кометам, предсказать появление которых считается невозможным. Предварительное обозначение состоит из номера года, за которым следует буква латинского алфавита, соответствующая номеру полумесяца, когда комета была открыта (перезоткрыта), и цифра, соответствующая номеру открытия в данном полумесяце (см. §1, таблица 1).
Годы/дуга	интервал, охваченный наблюдениями, по которым определена орбита
e	эксцентриситет орбиты.
i	наклон орбиты к плоскости эклиптики.
q	перигельное расстояние (в а.е.).
Q	афельное расстояние (в а.е.).
MOID	минимальное расстояние между орбитами кометы и Земли, выраженное в а.е. (§11)

(см. продолжение на следующей странице)

Пояснения к таблице 3 (продолжение)

 H_1

абсолютная звездная величина кометы, вычисляемая по формуле

$$H_1 = m - 2.5k \lg \Delta - 2.5n \lg r,$$

где m – наблюдаемая звездная величина кометы, r и Δ – гелио и геоцентрические расстояния кометы, k и n – числа, обычно определяемые из наблюдений; k часто принимается равным 2, а n – равным 4.

1) данные приведены по каталогу Кресака (Л. Кресак, электронная версия каталога)

2) данные, приведенные на сайте К.Миич (К. Meech) — <http://hwww.ifa.hawaii.edu/meech/>

3) данные приводятся по (Сагдеев и др., 1987)

4) данные приводятся по (Всехсвятский, 1958)

5) данные приводятся по (Всехсвятский, 1967)

6) данные приводятся по (Всехсвятский, 1979)

7) данные приводятся по (The Handbook of the British Astronomical Association, 1984; p. 93)

8) данные приводятся по (Nakano S. 1996. The Comet Handbook for 1996. Published by the Comet Section, Oriental Astronomical Association)

P

период вращения ядра в часах

 p

альбедо ядра

D

диаметр ядра

 \tilde{v}

геоцентрическая скорость кометы при гипотетическом столкновении с Землей, подсчитанная с учетом притяжения Земли (§12)

E

кинетическая энергия кометы относительно Земли, выраженная в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента (§13); подсчитана с учетом притяжения Земли

Таблица 4. Сближения потенциально опасных комет с Землей в ближайшие 200 лет

Комета	Дата	Δ_{min} (а.е.)	Δ_{min} (млн.км)
73P/Schwassmann-Wachmann 3-C	2006 5 13.195	0.073	10.92
73P/Schwassmann-Wachmann 3-B	2006 5 14.821	0.064	9.57
73P/Schwassmann-Wachmann 3-E	2006 5 17.666	0.050	7.48
103P/Hartley 2	2010 10 20.930	0.119	17.80
46P/Wirtanen	2018 12 15.691	0.075	11.22
107P/Wilson-Harrington	2039 10 31.379	0.108	16.16
21P/Giacobini-Zinner	2042 10 6.573	0.057	8.53
15P/Finlay	2060 10 26.877	0.047	7.03
73P/Schwassmann-Wachmann 3-C	2070 8 8.730	0.125	18.70
73P/Schwassmann-Wachmann 3-B	2109 6 27.362	0.097	14.51
73P/Schwassmann-Wachmann 3-C	2109 7 27.010	0.003	0.44
41P/Tuttle-Giacobini-Kresák	2125 5 7.543	0.107	16.01
8P/Tuttle	2130 12 25.808	0.096	14.36
1P/Halley	2134 5 8.801	0.083	12.42
73P/Schwassmann-Wachmann 3-B	2136 7 30.862	0.026	3.89
21P/Giacobini-Zinner	2146 4 14.690	0.073	10.92
107P/Wilson-Harrington	2155 10 30.006	0.096	14.36
41P/Tuttle-Giacobini-Kresák	2157 5 7.669	0.122	18.25
141P/Machholz 2-A	2168 11 12.744	0.095	14.21
72P/Denning-Fujikawa	2190 11 21.009	0.086	12.87
107P/Wilson-Harrington	2198 9 11.827	0.057	8.53

Примечание. Указаны сближения до минимальных расстояний, не превышающих 0.15 а.е. Буква, присоединенная к названию кометы, обозначает один из осколков, на которые она распалась.