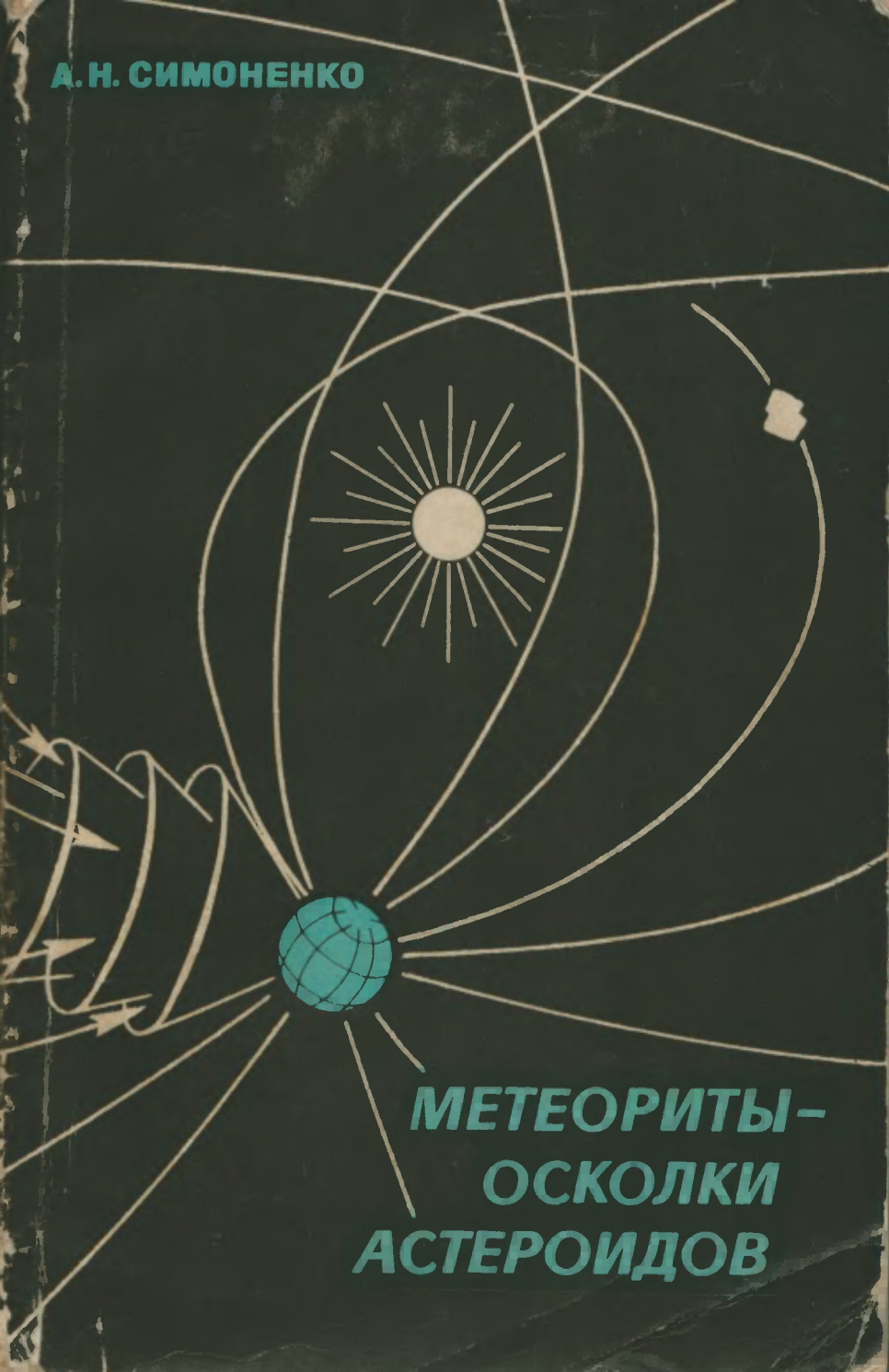


А. Н. СИМОНЕНКО



**МЕТЕОРИТЫ-
ОСКОЛКИ
АСТЕРОИДОВ**

А. Н. СИМОНЕНКО

МЕТЕОРИТЫ ОСКОЛКИ АСТЕРОИДОВ

Под редакцией Б. Ю. ЛЕВИНА



МОСКВА «НАУКА»

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1979

22.655

С 37

УДК 523.44+523.51

Симоенко А. Н. Метеориты — осколки астероидов / Под ред. Б. Ю. Левина. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. — 224 с. 1 р. 20 к.

Обобщаются результаты изучения астероидов и метеоритов, полученные разными методами в нашей стране и за рубежом. Основное внимание уделено достижениям последних лет. Астероиды рассматриваются как родительские тела метеоритов — наилучших образчиков первичного вещества Солнечной системы, наименее измененных последующими процессами. Прослеживается, как метеориты приобретали основные черты своего состава и структуры сначала в недрах, а потом в поверхностном раздробленном слое (реголите) родительских тел разных поколений.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся метеоритикой и астрофизикой Солнечной системы. Она будет полезна для студентов и аспирантов. Изложение доступно для понимания и более широкому кругу читателей.

Илл. 66, табл. 8.

Алла Николаевна Симоенко

МЕТЕОРИТЫ — ОСКОЛКИ АСТЕРОИДОВ

М., 1979 г., 224 стр. с илл.

Редактор *Г. С. Куликов*

Техн. редактор *Л. В. Лихачева*. Корректор *О. М. Кривенко*

ИБ № 11220

Сдано в набор 23.03.79. Подписано к печати 22.06.79. Т-13105.
Бумага 84×108^{1/32}. Тип. № 1. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать.
Условн. печ. л. 11,76. Уч.-изд. л. 12,29. Тираж 4000 экз. Заказ № 1723
Цена 1 р. 20^к.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

2-я типография издательства «Наука» Москва, Шубинский пер., 10

20604—112
105 79 705050000
853.102:79

© Главная редакция
физико-математической
литературы
издательства «Наука», 1979

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	9
Глава I. Метеориты	15
§ 1. Камни и железные глыбы падают с неба	15
Идеи Хладни и начало научной метеоритики	16
Подход к определению орбит метеоритов	18
§ 2. Вещество метеоритов	21
Основы классификации метеоритов	22
Хондриты	24
Железные метеориты и ахондриты	31
Железо-каменные метеориты	36
§ 3. Возрасты метеоритов	39
Глава II. Астероиды	46
§ 4. Старые и новые открытия астероидов	46
Между орбитами Марса и Юпитера	46
Астероиды, проникающие внутрь орбиты Марса	50
На орбите Юпитера и за ее пределами	52
§ 5. Кольцо астероидов	55
Движение типичных астероидов	55
Возмущения со стороны планет	57
Люки Кирквуда	62
Резонансные астероиды	64
Либрационные движения Троянцев	68
Гипотетические «троянцы» Сатурна	69
Семейства астероидов	70
§ 6. Группы Аполлона и Амура	76
Состав групп Аполлона и Амура	76
Люки в распределении иеригелиев оскулирующих орбит	80
Вековые возмущения орбит астероидов групп Аполлона и Амура. Сохранение люков. Членство в группах	83
Астероиды на малых орбитах (группа IV)	87
Гипотетические «троянцы» Земли	91
Кратные резонансы	95
§ 7. Физические свойства астероидов	97
Размеры, массы, альbedo	97
Химический и минералогический состав поверхностных слоев астероидов. Их структура	106

Распределение объектов разных классов в кольце астероидов и его окрестностях	113
Суммарный объем астероидов. Общая масса астероидного вещества	116
Форма и вращение астероидов	120
Температура поверхности астероидов	127
Г л а в а III. Родительские тела метеоритов	130
Иерархия родительских тел метеоритов	130
§ 8. Первичные родительские тела метеоритов	132
Термическая история метеоритов. Размеры их родительских тел	132
Гинотеза расплавленных недр	141
Источники тепла и расчеты термической истории астероидов	146
§ 9. Промежуточные родительские тела метеоритов	152
Кратерообразование на астероидах. Создание реголита	152
Следы пребывания метеоритного вещества в реголите. Треки, инертные газы, микрократеры	156
Следы пребывания метеоритного вещества в реголите. Метеоритные брекчии	160
Консолидация реголита	164
Другие эффекты, вызванные столкновениями астероидов	168
О возможности более сильного влияния столкновений астероидов на формирование метеоритного вещества	175
§ 10. Последние родительские тела метеоритов	181
Претенденты на роль последних родительских тел метеоритов	182
Метеоритообразующие астероидные обломки. Непредставительность метеоритных коллекций. Конусы сбора метеоритов	188
Возможные последние родительские тела метеоритов среди известных астероидов групп Аполлона и Амура	193
Сравнение состава метеоритов и их последних родительских тел	203
Заключение	205
П р и л о ж е н и я	206
Приложение 1. Минералы метеоритов	206
Приложение 2. Минералы в метеоритах разных классов	209
Приложение 3. Некоторые сведения о 360 астероидах	211
Литература	216

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследования в области метеоритики — один из путей решения задач космогонии, прежде всего нашей Солнечной системы. Среди этих исследований в настоящее время основное место занимают исследования метеоритного вещества, которые открывают единственную возможность узнать, каким было вещество протопланетного облака. Дело в том, что вещество метеоритов (большая часть их) не претерпело магматической дифференциации в недрах своих родительских тел, тогда как даже вещество лунных материков оказалось прошедшим такую дифференциацию. Более того, как показали новейшие исследования, среди метеоритов встречаются образцы (углистые метеориты типа CI), которые представляют собой практически не измененную никакими процессами, а лишь слабо консолидированную межзвездную пыль. Это обстоятельство неизмеримо увеличило ценность метеоритов.

Результаты исследований метеоритного вещества способны перенести нас на 4,5 млрд. лет назад и дать ключ к пониманию тех процессов, которые привели к рождению Солнечной системы. Однако для этого нужно сначала решить ряд «вспомогательных» задач.

Во-первых, мы должны разобраться в генетических связях между метеоритами разных типов и понять, какие различия их вещества объясняются фракционированием в протопланетном облаке, а какие — дифференциацией в родительских телах метеоритов, т. е. астероидах. Для этого крайне полезно было бы как можно полнее выяснить, каков был весь ансамбль протопланетного вещества в период формирования планетезималей на разных гелиоцентрических расстояниях. Метеориты наших коллекций не являются репрезентативным его набором. В этом плане много может дать выявление в метеоритах чужеродных обломков, по каким-то причинам

не встреченных в виде отдельных метеоритов. Сведения же о наиболее хрупких и рыхлых телах, не выдерживающих полет сквозь земную атмосферу и потому не попадающих в лаборатории, позволяют получить болидные сети, созданные в разных странах мира. Фотографирование болидов, порожденных такими телами, дает информацию об их плотности, механических свойствах и химическом составе. Наконец, еще один источник сведений о первичном ансамбле — исследования астероидов и комет астрофизическими методами. Все эти пути познания ансамбля первичного вещества протопланетного облака еще только начинают осваиваться.

Во-вторых, перед метеоритикой стоит задача определения места формирования в протопланетном облаке вещества разных типов. Методы небесной механики в сочетании с учетом негравитационных эффектов могут пролить свет на то, где двигались первичные родительские тела метеоритов разных типов. Только тогда может быть окончательно решен вопрос об условиях, господствовавших в протопланетном облаке. Насколько важны данные метеоритики, видно уже из того, что космогонические теории как ранних этапов существования протопланетного облака, так и процесса формирования планет, уже не раз претерпевали ломку при получении новой информации о метеоритном веществе.

Однако, несмотря на то, что метеоритное вещество весьма примитивно, нельзя недооценивать роль тех процессов, которые воздействовали на него на стадии родительских тел разных поколений.

Столкновения этих тел должны были приводить и приводили к различного рода изменениям химического состава (вызывая, например, селективное испарение) и структуры первичного вещества. Эти изменения едва лишь начинают идентифицироваться в метеоритном веществе. В теоретическом плане (анализ p - T - v - t -условий при столкновениях крупных тел астероидных размеров) исследования почти не ведутся.

Между тем уровень развития современной науки, по-видимому, позволяет решить поставленные вопросы при разумной организации работ в ближайшие 10—15 лет.

Итак, современная метеоритика является сложной и но самой сути своей комплексной наукой, требующей

объединения усилий специалистов разных областей знания — астрономов, физиков, химиков, минералогов, геологов, геофизиков и др. Ненормированное развитие разных аспектов метеоритики, интенсивное развитие методов исследования метеоритного вещества при резком отставании других направлений исследований не позволяют эффективно использовать получаемые результаты для познания окружающего мира. Поэтому особое значение приобретает централизация исследований и обмен результатами между специалистами, работающими в разных областях метеоритики.

Учитывая это обстоятельство, автор взял на себя смелость изложить в этой книге некоторые проблемы метеоритики, продемонстрировав их неразрывную связь друг с другом. Но автор не ставил своей целью сделать книгу исчерпывающим источником сведений о метеоритах и их родительских телах — астероидах, как и сведений по космогонии Солнечной системы. Этим объясняется неоднородность изложения. Более подробно изложены те вопросы, которые раньше не освещались в отечественной литературе по метеоритике (например, процесс роста октаэдритовой структуры железных метеоритов). Еще больше внимания уделено современным исследованиям, не развивающимся или развивающимся пока недостаточно в нашей стране (например, астрофизические исследования астероидов).

Автор надеется, что изложение окажется доступным для широкого круга специалистов, работающих как в области метеоритики, так и в смежных областях. Как бы ни было велико значение метеоритики для космогонии, нельзя забывать о тех возможностях, которые таит метеоритика, например, для кристаллофизики. Исследования метеоритного вещества открывают возможности для анализа формирования разного рода структур в условиях невесомости, в частности, процесса роста крупных монокристаллов. Ведь в метеоритах выросли монокристаллы почти чистого никелистого железа 2-метровых размеров. В этом плане астероиды можно рассматривать как естественные лаборатории, созданные самой природой задолго до того, как человек, осваивая космос, создал лаборатории на искусственных спутниках Земли.

В заключение автор выражает глубокую благодарность всем сотрудникам Комитета по метеоритам АН СССР, сотрудникам библиотеки этого Комитета, которые оказывали большую повседневную помощь в написании этой книги, а также проф. Б. Ю. Левину, чье пристальное внимание и ценные советы помогали мне на протяжении всей работы.

А. Симоненко

Комитет по метеоритам АН СССР,
Москва, январь 1979 г.

ВВЕДЕНИЕ

Почти 5 млрд. лет кружится около Солнца Земля, родившаяся, как и другие планеты Солнечной системы, в протопланетном облаке среди каменных глыб, камней и пылинок. Уже за первые 100 млн. лет Земля вычерпала почти все твердое вещество, двигавшееся в окрестностях ее орбиты, аккумулировав около $6 \cdot 10^{21} \text{ т}$ этого вещества и достигнув почти современных размеров. Вначале скорость аккумуляции быстро росла и достигла громадного значения $\sim 10^{14} \text{ т/год}$. Но по мере вычерпывания вещества скорость аккумуляции стала падать, рост Земли замедлился, а затем практически прекратился.

Однако до сих пор Земля продолжает встречать на своем пути пыль, камни и даже глыбы километровых размеров, вычерпывая до $\sim 10^4 \text{ т}$ вещества в год (Симопепко и Левин, 1972). Но это не остатки эпохи формирования Земли. Твердое вещество, двигавшееся тогда в окрестностях земной орбиты и не вошедшее в состав Земли (и Луны), с тех пор не сохранилось. Часть его распылилась во взаимных столкновениях, после чего световое давление вымело из Солнечной системы наиболее мелкие пылинки субмикронных размеров, а более крупные осели на Солнце в результате сокращения их орбит под действием радиативного торможения (эффект Пойнтинга — Робертсона). Другая часть вещества либо была выловлена планетами, либо в результате тесных сближений с планетами была выброшена из внутренних районов Солнечной системы.

Вещество, ныне вынадающее на Землю, — это продукты разрушения кометных ядер и астероидов. Частицы кометного происхождения — мелкие и хрупкие. Проникая в атмосферу Земли, они на долю секунды вспыхивают метеорами и, иснаряясь, прекращают свое существование. Движение метеоров по параллельным траекториям свидетельствует о том, что Земля погрузилась в один из ме-

теорных роев, т. е. в рой частиц, движущихся вдоль орбиты кометы-родоначальницы. Такой рой представляет собой молодое образование, еще не «растрепанное» возмущениями, и его толщина определяется теми скоростями, с которыми частицы, увлекаемые потоками испаряющихся летучих веществ, покидают кометное ядро. Эти скорости для частиц сантиметровых и миллиметровых размеров оцениваются в метры и десятки метров в секунду.

Не известно ни одного случая, когда бы одно из тел метеорного роя оказалось способно преодолеть сопротивление земной атмосферы и достигнуть поверхности Земли в виде метеорита. Более того, оценки масс тел, движущихся в метеорных роях (и следовательно, имеющих кометное происхождение), основанные на анализе кривых блеска порожденных ими метеоров, показывают, что эти массы невелики ($\leq 10-100$ г), а размеры их не превышают нескольких сантиметров (см., например, Миллман, 1976).

Частицы кометного происхождения представляют собой рыхлые конгломераты, сформировавшиеся на поверхности кометных ядер из нелетучих и малолетучих веществ, вошедших в состав этих ядер из протопланетного облака в виде мелких пылинок или оказавшихся подмешанными в вещество кометных ядер в атомном или молекулярном состоянии (Левин, 1962): В процессе испарения кометных ядер нелетучие и малолетучие вещества скапливаются на поверхности и слегка «спекаются».

По разным оценкам кометная компонента в межпланетном веществе, выпадающем на Землю, составляет $\geq 98\%$. На долю астероидной компоненты приходится $\leq 2\%$ этого вещества. Это пыль и обломки разных размеров. Они образуются при дроблении астероидов в столкновениях друг с другом. Только среди астероидных обломков встречаются крупиные прочные и плотные камни разного состава, выпадающие в виде метеоритов.

Астероидные обломки, вторгаясь в атмосферу Земли с космической скоростью, порождают в атмосфере нередко грандиозные явления и движутся, окруженные бушующей плазмой. Тем не менее метеориты, достигающие поверхности Земли, оказываются образчиками астероидного вещества, не изменившегося во время полета в атмосфере. Набегающий поток воздуха нагревает лобовую

поверхность астероидного обломка до температур в десятки тысяч градусов. Но благодаря большой скорости движения обломка нагрев идет очень быстро, и в его приповерхностном слое создаются огромные градиенты температуры. Весь полет длится немногие секунды, и тепло не успевает отводиться внутрь обломка. Нагретые же поверхностные слои интенсивно плавятся, разбрызгиваются и испаряются. Какой из этих процессов доминирует, зависит от состава обломка.

Итак, слой нагретого вещества непрерывно уносится с поверхности обломка. Эта участь постигает всё новые и новые слои, под которыми вещество остается холодным. Вопрос заключается только в том, уцелеет ли заметный остаток к моменту потери космической скорости (в результате торможения атмосферой). Если да, то это и будет метеорит, с сохранившейся структурой и составом космического вещества. Потере массы (абляции) обломка в атмосфере способствует дробление обломка в процессе полета, которое увеличивает аблирующую поверхность. Но для каждого выжившего после дробления осколка сказанное выше остается в силе.

Следы бушевавших процессов остаются на метеорите лишь в виде тонкой коры плавления — топкого слоя застывшего расплава, не успевшего испариться после потери космической скорости и прекращения интенсивного нагрева. Под ним — космическое вещество, «доставленное» на Землю в целостности и сохранности (рис. 1).

В коллекциях мира собрано более 3000 метеоритов. Около 1000 из них наблюдались при падении, остальные найдены случайно *). Эти метеориты, общей массой в несколько сотен тонн, до космической эры были единственным внеземным веществом, доступным лабораторному изучению. Доставленные на Землю образцы вещества из поверхностного слоя Луны не снизили интерес к метеоритам. Дело в том, что образцы лунных пород являются продуктом магматической дифференциации недр Луны, как земные горные породы являются продуктом магматической дифференциации недр Земли. Между тем почти все метеориты, представленные в наших коллекциях, не

*) Более 1000 метеоритов найдено в 70-х гг. в Аптарктиде (Нагата, 1978 и др.).

прошли через подобную дифференциацию и потому в гораздо большей степени отражают процессы, протекавшие при самом формировании протопланетных тел Солнечной

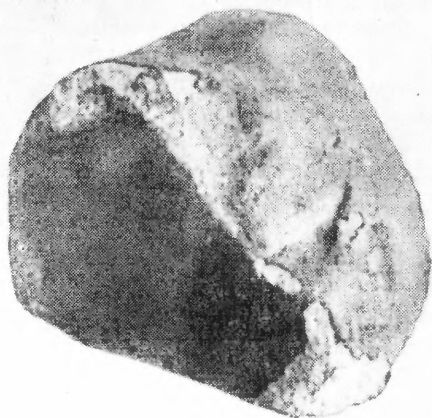
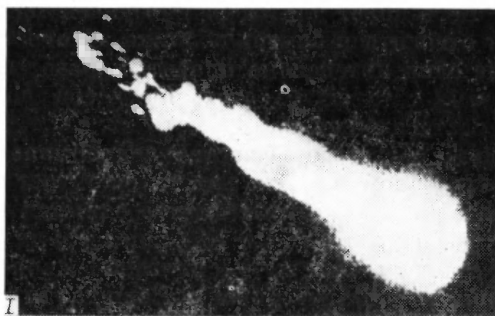


Рис. 1. *I* — метеорит Боведи во время движения в атмосфере Земли 25 апреля 1969 г.; *II* — выпавший метеорит Боведи.

системы. Более того, имеются такие метеориты, состав и структура которых указывают на то, что они не подвергались существенным физико-химическим изменениям со времен аккумуляции их родительских тел. Эти метеориты — самые примитивные остатки протопланетного вещества, самые древние камни, доступные изучению в лабо-

раториях. Они содержат в зашифрованном виде сведения о самом пачальном этане до сих пор плохо понятного процесса формирования планет Солнечной системы из газопылевого облака.

Физико-химические процессы, протекавшие в протоплазетном облаке, не поддаются лабораторному моделированию и являются предметом теоретических построений, основанных на тех или иных исходных предположениях. Поэтому метеориты со всеми их особенностями, вскрываемыми при лабораторных исследованиях, играют важнейшую роль и как базис, и как пробный камень теоретических концепций. Это объясняет, почему так велик интерес ко всем аспектам происхождения метеоритов.

На представления о происхождении метеоритов большое влияние оказали результаты изучения планет и прежде всего результаты изучения лунных образцов. Когда на Землю были доставлены образцы лунных пород и лунного грунта, в их анализах основную роль стали играть исследователи метеоритов, привыкшие иметь дело с малыми образцами космического вещества. В ходе этих исследований произошло колоссальное усовершенствование техники анализов. Получили развитие некоторые новые идеи. Затем началось обратное влияние исследований лунных образцов на метеоритику — как методическое, так и идейное. Новые экспериментальные методы стали применяться для изучения метеоритов. Стало возможным, например, исследовать состав и возраст отдельных хондр и их частей, а также отдельных крупинок межхондрового вещества метеоритов, о чем еще недавно можно было только мечтать. Идеи о многократном перемешивании однородного и разнородного вещества, лежащие в основе понимания и лунного реголита, и лунных брекчий, все шире и шире привлекаются при попытках восстановить прошлое как тех метеоритов, которые имеют явно выраженную брекчиевую структуру, так и тех, у которых подобная структура не бросается в глаза.

В небольшой книжке, предлагаемой вниманию читателя, невозможно осветить все аспекты происхождения метеоритов, и мы ограничимся лишь историей их пребывания в родительских телах — астероидах. В значительной степени это диктуется тем обстоятельством, что 70-е годы XX в. знаменуют новый этап развития метеоритики.

До этого времени исследования метеоритов и астероидов, начатые почти одновременно на рубеже XVIII и XIX вв., развивались независимо: метеориты изучались в лабораториях геологами, металлургами и минералогами, астероиды — астрономами, в основном небесными механиками. Только в последние годы методы астрофизики позволили получить сведения о составе и физических свойствах астероидов и создали реальную базу для соединения этих двух обширных областей знания в одну.

Отражая эту ситуацию, главы I и II знакомят читателя с основными сведениями о метеоритах и астероидах, важными для понимания их взаимной связи. Сама же эта связь рассматривается в главе III, которая посвящена вопросам формирования вещества в недрах и на поверхности астероидов, а также возможности попадания этого вещества на Землю в виде мелких обломков. Случайно выловленные Землей и вынавшие на ее поверхность эти обломки лишь в силу исторических причин получили особое название — метеориты. Особым классом объектов они не являются.

Глава I

МЕТЕОРИТЫ

§ 1. Камни и железные глыбы падают с неба

«Начало преданий о низпадающих из воздуха камнях и железных глыбах теряется в глубочайшем мраке веков протекших», — писал более полутора веков назад известный химик Петербургской Академии Иван Мухин (1819). Века сменялись веками, а метеориты оставались неразгаданной тайной. Их падение нередко было столь грандиозным, что интерес к метеоритам возрождался вновь и вновь. О них слагали легенды, о них писали в летописях, их боялись, им поклонялись, даже приковывали цепями, чтобы они вновь не улетели на небо *).

Анаксагор и другие древние мыслители считали, что метеориты — это обломки тверди небесной. Однако позднее, когда отказались от самой тверди небесной, перестали верить и в то, что камни и железные глыбы могут падать с неба.

Во второй половине XVIII в. философы, физики, химики и минералоги пытались объяснить происхождение метеоритов атмосферными конденсациями, вулканическими извержениями и т. п. В 1772 г. известный французский химик А. Лавуазье с группой ученых представил доклад Парижской Академии, в котором утверждалось, что метеориты являются обыкновенными земными камнями, подвергшимися ударам молнии.

Между тем постепенно накапливалось все больше подробных описаний явлений, сопровождавших падение метеоритов, — болидов. Австрийский минералог Штютц

*) Описания падений многих метеоритов собраны Е. Л. Криновым (1955, 1963 и др.).

обратил внимание на сходство описаний падения железного метеорита Грашина в 1751 г. и каменного метеорита Эйхштадт в 1785 г. и заметил, что «у очевидцев не было никаких оснований сговариваться, чтобы лгать столь одинаково».

В это время астрономы уже определяли траектории метеоров и болидов в атмосфере из базисных наблюдений (не связывая, впрочем, болиды с метеоритами) и все снова и снова приходили к выводу о том, что причина, порождающая эти явления, лежит вне Земли. Английский астроном директор Гринвичской обсерватории Н. Маскелин в конце XVIII в. уже прямо заявлял, что болиды порождаются твердыми частицами, движущимися по гелиоцентрическим орбитам, когда они проникают в земную атмосферу.

Идеи Хладни и начало научной метеоритики. В феврале 1793 г. физик Г. Лихтенберг из Гёттингена посоветовал навестившему его уже широко известному в то время немецкому физику — «отцу акустики» Э. Хладни собрать и изучить подробные описания болидов, особенно те, из которых можно судить об их атмосферных траекториях, а затем сравнить эту информацию с тем, что известно об объектах, «унавших с неба». По свидетельству самого Хладни (1803), Лихтенберг обладал редким даром высказывать идеи, которые стимулировали новый взгляд на вещи и могли привести к новым важным результатам.

Хладни последовал совету Лихтенберга и всего через год издал в Риге небольшую книжку, насчитывающую всего 63 страницы, положившую начало научной метеоритике (Хладни, 1794). В ней Хладни систематизировал опубликованные данные о падениях и находках метеоритов и обоспосвал связь между болидами и метеоритами. В 1974 г. эта книжка была переиздана, и в предисловии к ней известный американский исследователь метеоритов Дж. Вассон написал:

«Сегодня очень легко забыть, насколько важно для Хладни было показать связь между болидами и метеоритами. Как только эта связь была признана, многие из распространенных тогда теорий [происхождения метеоритов] начинали казаться неверными или невозможными. По этой причине очень большое место отводилось сообщениям о болидах, которые наблюдались многими ли-

цами и которые дали выпадение одной или нескольких сразу же обнаруженных масс... Пробным камнем явления стало подробное сообщение Штютца... о падении двух железных масс близ Грашины... в 1751 г.».

Особое место в исследованиях Хладни занимают железные метеориты и среди них Палласово Железо — крупный железо-каменный метеорит массой более 600 кг, обнаруженный русским естествоиспытателем П. С. Палласом во время его путешествия по Сибири в 1771—1773 гг. и вывезенный в Петербург. Обобщая сведения о падениях железных метеоритов и их находках, а также о свойствах железных метеоритов, с одной стороны, и опыт, накопленный в металлургии, с другой, Хладни пришел к выводу о неземном, космическом происхождении Палласова Железа и сходных с ним железных масс.

«Если у планет было начало, — писал Хладни (1794), — то либо они должны были образоваться из сгустков вещества, паходившегося в неконсолидированном хаотическом состоянии и рассеянного по огромному объему пространства до тех пор, пока гравитационное притяжение не собрало его в крупные массы; либо новые планетные тела формировались из фрагментов, намного больших, чем те, которые раздробились в результате внешних столкновений или внутренних взрывов... Представляется более вероятным, что многие из этих первичных тел не смогли объединиться и образовать более крупные тела, так как были слишком удалены друг от друга или двигались с чрезмерно большой скоростью, и в результате остались самостоятельными телами... и продолжали свой путь в пространстве до тех пор, пока, понав в сферу тяготения какой-нибудь планеты и надая на нее, не приводили к метеоритному явлению.»

Тема захватила Хладни, и он неоднократно возвращался к ней, все более развивая представления о космической природе железных и каменных метеоритов (Хладни, 1799, 1803, 1819).

Идеи Хладни оказались весьма прогрессивными и довольно быстро завоевали признание во всей Европе. Этот успех в большой степени объясняется тем, что почти в то же время были открыты первые астероиды (§ 4). Обнаружение мелких тел, движущихся между орбитами Марса и Юпитера, ~~оказалось~~ большой косвенной поддержкой

для представлений о мелких телах в окрестностях земной орбиты.

Подход к определению орбит метеоритов. Метеориты, уже признанные космическими объектами, оставались, однако, предметом изучения преимущественно химиков и минералогов, пытавшихся понять природу этих удивительных по составу и структуре камней и те процессы, которые их создали. Астрономам мало что удавалось сделать. Причина заключалась в том, что падения метеоритов непредсказуемы и чрезвычайно редки. Поэтому падения метеоритов наблюдают, как правило, случайные очевидцы. Между тем падение метеорита — это короткий заключительный эпизод в космической жизни метеорита, из которого только и можно получить сведения о его прошлом движении в межпланетном пространстве, определить орбиту. Из показаний очевидцев удается, да и то не всегда, определить только атмосферную траекторию болида. Чтобы определить орбиту метеорита, необходимо знать еще и его скорость. Однако скорости из показаний очевидцев получаются крайне ненадежными, систематически завышенными и для определения орбит использованы быть не могут.

Поэтому при определении орбит метеоритов обычно исходили из какого-нибудь общего соображения. Так, директор Тулузской обсерватории Ф. Пти, начавший в 30-х гг. прошлого века систематическое определение орбит болидов (среди которых были и закончившиеся выпадением метеоритов), руководствовался распространенным тогда представлением, что болиды порождаются телами, постоянно движущимися по околоземным орбитам, и могут наблюдаться неоднократно. В соответствии с этим Пти, задавая небольшие геоцентрические скорости тел, получил, естественно, околоземные орбиты.

Фундаментальное и широко известное исследование движения 116 метеоритов, проведенное Х. Ньютоном (1888) в самом конце прошлого века, базировалось на предположении о том, что гелиоцентрические скорости метеоритов заключены в пределах 37—42 км/сек. В соответствии с этим Ньютон получил, что истинные радианты метеоритов (соответствующие вектору гелиоцентрической скорости) концентрируются в полусфере, окружающей антиапекс Земли. Из 116 метеоритов 109 оказались дви-

гавшимися по гелиоцентрическим орбитам в прямом направлении и догоняли Землю, и только семь двигались в обратном направлении, навстречу Земле. Перигелийные расстояния орбит оказались расположенными между 0,5 и 1 а.е.

Среди выводов, сделанных Ньютоном, один заслуживает особого внимания. «Или метеориты, движущиеся около земной орбиты, имеют вообще прямое движение, — писал он, — или же метеориты, имеющие обратное движение, не могут по какой-то причине пройти через воздух и достигнуть поверхности в твердом состоянии.» В дальнейшем мнение о том, что не все круиные тела, проникшие в атмосферу Земли, достигают ее поверхности, высказывалось неоднократно. Возникло представление о наличии некоторого верхнего предела скорости у метеоритообразующих тел. В 1923 г. П. Н. Чирвицкий уже прямо писал: «Только болиды, движущиеся прямо и принадлежащие к орбитам с малым наклоном к эклиптике, могут упасть на земную поверхность, давши метеориты. Что касается роев с попятным движением, то они при встрече с верхними слоями атмосферы вследствие громадных скоростей так накаливаются, что улетучиваются или пролетают насквозь, во всяком случае, не падают на Землю.»

Б. Ю. Левин (1946), разрабатывая физическую теорию метеоров и анализируя характер взаимодействия метеорных тел с атмосферой Земли, указал на сильную зависимость степени их абляции от начальной скорости движения в атмосфере. Он пришел к выводу, что верхний предел скорости метеоритообразующих тел составляет около 20 км/сек. Это объяснило, почему ни встречные тела, ни те из догоняющих, которые приближаются к земной орбите под значительным углом к ней, не могут выпасть в виде метеоритов, если даже они являются механически прочными: такие тела не могут обладать малой геоцентрической скоростью и войти в земную атмосферу со скоростью $v_0 \lesssim 20$ км/сек. Редким исключением могут быть лишь тела огромной массы, способные «пробить» земную атмосферу даже при большой скорости движения.

Значение верхнего предела скорости входа в атмосферу метеоритообразующих тел впоследствии было уточнено на основании результатов наблюдений болидов с помощью

сетей фотографических камер (так пазываемых болидных сетей; см. ниже) и может быть принято равным ~ 22 км/сек.

Земное притяжение создает у этих тел нижний предел скорости входа в атмосферу, соответствующий скорости падения на Землю тела, имевшего вдали от нее (вне сферы ее действия) нулевую геоцентрическую скорость. Это так называемая вторая космическая скорость, равная $11,2$ км/сек.

Используя интервал возможных скоростей вступления в атмосферу Земли метеоритообразующих тел, а именно $22 \geq v_0 \geq 11,2$ км/сек, т. е. приписывая каждому метеориту все значения скорости, заключенные внутри указанного интервала, оказалось возможным оценить области неопределенности элементов орбит многих метеоритов (Левин и Симоненко, 1969; Симоненко и Левин, 1974; Симоненко, 1975 и др.). Во многих случаях эти области неопределенности оказались невелики (что понятно, поскольку скорость метеорита известна с точностью до ± 5 км/сек), и характер орбит определен надежно. (Мы рассмотрим полученные таким способом результаты в § 10.)

Такой путь получения сведений об орбитах метеоритов, хотя и дает мало точные результаты, к сожалению, остается практически единственным. Нет никаких надежд, что ситуация в будущем может серьезно измениться. Только в редких случаях анализ содержаний космогенных изотопов в свежеспавших метеоритах позволит уточнить орбиты метеоритов, но лишь после того как пространственно-временные вариации интенсивности космических лучей в межпланетном пространстве будут изучены достаточно хорошо (Лаврухина и др., 1972).

Инструментальные регистрации атмосферных траекторий и скоростей болидов, закончившихся падением метеоритов, практически отсутствуют. В 1959 г. чехословацким астрономам впервые удалось получить базисные фотографии (с применением обтюлятора) болида, давшего метеорит Пржибрам. За этим последовало создание болидных сетей, предназначенных для систематических наблюдений болидов. Они были созданы сначала на территории США, затем в Чехословакии (позднее сеть была расширена на территорию ГДР и ФРГ и стала называться Евро-

пейской), в Канаде, Англии и СССР. Каждая сеть охватывала территорию около 10^6 км².

Основной целью, которую сначала ставили создатели сетей, было фотографирование падений метеоритов и определение орбит этих тел. За 10 лет существования сети США (называемой чаще Прерийной сетью) удалось сфотографировать падение в 1970 г. метеорита Лост Сити, а затем сеть была свернута. Канадская сеть в 1977 г. сфотографировала падение метеорита Иннисфри. В настоящее время этими тремя метеоритами список и исчерывается. Только для них известны точные орбиты (см. § 10).

Были получены фотографии еще нескольких болидов, порожденных объектами, для которых на основании анализа кривых блеска болидов делался вывод о выпадении масс порядка 1 кг. Однако метеориты не были найдены, несмотря на то, что точки их падения определялись с точностью до нескольких сотен метров.

Тем не менее болидные сети сыграли огромную роль. С их помощью были получены многие ценные сведения об объектах, движущихся в окрестностях земной орбиты уточнен приток космического вещества на Землю вообще и приток метеоритов, в частности (Мак-Кроски и др., 1978; Цеплева, 1978).

§ 2. Вещество метеоритов

По внешнему виду, составу и структуре метеориты крайне разнообразны. Их делят на три основных класса: каменные, железные и железо-каменные, резко отличающиеся друг от друга по всем признакам.

В падающем на Землю потоке 92% каменных, 6% железных и 2% железо-каменных метеоритов (85, 10 и 5% соответственно по массе). Но в музейные коллекции чаще попадают железные метеориты, иногда весьма значительных размеров, потому что их легче найти на земле: они дольше сохраняются и привлекают к себе внимание необычным видом и весом, тогда как каменные метеориты подвергаются интенсивному выветриванию и остаются затерянными среди сходных по виду земных камней.

Основными минералогическими составляющими метеоритного вещества являются железо-магнезиальные си-

ликаты и никелистое железо. Иногда в значительных количествах присутствуют сульфиды железа.

Железо-магнезиальные силикаты представлены главным образом оливинами $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$ и пироксенами $(\text{Fe, Mg})\text{SiO}_3$ разного состава от почти чистого фаялита Fe_2SiO_4 и ферросилита FeSiO_3 до почти чистого форстерита Mg_2SiO_4 и энстатита MgSiO_3 . Они присутствуют в виде мелких кристаллов или в виде стекла, обычно частично раскристаллизованного.

Никелистое железо представляет собой твердый раствор никеля в железе FeNi . Концентрация никеля в никелистом железе различна: от 6—7 до 30—50%, но встречается изредка и безникелистое железо. При высоком содержании никеля никелистое железо представлено в основном тэнитом — минералом с гранцентрированной ячейкой кристаллической решетки, при низком содержании никеля в метеорите никелистое железо состоит почти из одного камасита — минерала с объемно-центрированной ячейкой решетки (более подробно см. § 8).

В метеоритах выявлено около 140 минералов, и хотя открывают все новые и новые, ясно, что число минералов метеоритов мало по сравнению с числом минералов земных горных пород, которых известно более 1000. Это свидетельствует о примитивном характере метеоритного вещества.

Один из последних списков минералов метеоритного вещества был составлен Л. Г. Кваша (1976). С небольшими дополнениями он воспроизводится в Приложении 1. Многие из указанных в нем минералов не встречаются на Земле. Правда, большая часть этих минералов присутствует в метеоритном веществе в малых количествах и, кроме того, не во всех метеоритах, а лишь в метеоритах некоторых типов.

Основы классификации метеоритов. Первые попытки классифицировать метеориты по тем или иным признакам относятся еще к середине прошлого века. Классификация метеоритов, сначала простая, совершенствовалась и становилась все более сложной по мере того, как накапливались сведения об их веществе, структуре и внешнем виде. По существу, классификация метеоритов всегда преследовала одну цель: построить схему генетических связей между метеоритами разных типов и в конечном счете решить задачу их происхождения. Каждый исследователь создавал

классификацию метеоритов в соответствии со сложившимися в его представлении общими идеями происхождения метеоритов.

Долгое время господствовало представление о том, что метеориты являются обломками одной планеты. Поэтому исходное вещество для всех метеоритов считалось одинаковым, а все различия должны были быть созданы в ходе магматической дифференциации этой планеты, как это произошло с горными породами Земли. Поэтому в основу классификации метеоритов клали минералогию как указатель процессов, которым подвергалось метеоритное вещество.

Лишь в 50-х гг. было осознано, что метеориты происходят не из одного крупного тела, а из многих более мелких, сформировавшихся в протопланетном облаке на разных гелиоцентрических расстояниях. Это позволило многие особенности состава метеоритов (непонятные с точки зрения дифференциации вещества в недрах одного тела) объяснить фракционированием вещества в протопланетном облаке и теми физико-химическими процессами, которые происходили на этой стадии. В связи с этим наметилась тенденция в основу современной классификации метеоритов класть химический состав вещества (который мог быть различным у разных родительских тел метеоритов), а минералогию и структуру метеоритного вещества рассматривать как важные, но дополнительные признаки.

В настоящее время существует несколько схем классификации метеоритов, в которых отдельные ячейки схем частично перекрываются, частично исключают друг друга (Явнель, 1978), но ни одна из этих схем не может претендовать на завершенность и не позволяет еще понять генетические связи между метеоритами разных типов. Они предполагают только, что к одной и той же наименьшей ячейке схемы классификации относятся метеориты очень сходного состава, а метеориты, расположенные в схеме классификации в соседних ячейках, обладают рядом сходных признаков, например, сходной структурой (Вассон, 1974).

Еще недавно казалось, что практически все метеориты можно распределить по весьма небольшому числу ячеек схемы классификации. Иными словами, казалось, что существует дискретность химического и минералогического состава метеоритов и их других признаков, что как будто

свидетельствовало о том, что в коллекциях собраны обломки небольшого числа малых астероидов: ведь дробление крохотного астероида размерами порядка 1 км на куски метровых и меньших размеров (что даст миллиарды обломков) достаточно, чтобы обеспечить выпадение на Землю метеоритов редких типов с наблюдаемой интенсивностью в течение сотен миллионов и даже миллиардов лет, а чтобы обеспечить выпадение метеоритов наиболее часто встречающихся типов, нужно раздробить астероид поперечником всего в несколько километров. Но малый астероид, — именно потому, что он мал, — отражает состав и структуру лишь того слоя более крупного астероида, из которого он выкололся. Поэтому обломки, получившиеся при дроблении малого астероида, характеризуют лишь небольшой объем первичного родительского тела метеорита.

В последние годы применение все более тонких методов анализа метеоритного вещества показало, что это вещество более разнообразно, чем предполагалось, и плохо укладывается в существующие схемы классификации. У метеоритов одного типа стали обнаруживать всё новые различия, и появилась тенденция всё новые метеориты из числа изученных ранее «зачислять в разряд особых», или аномальных. Были найдены метеориты «промежуточного состава», заполняющие пробелы между метеоритами разных типов, и стали высказываться соображения о том, что по составу метеориты образуют непрерывную последовательность (например, Рейд, 1974). С другой стороны, между метеоритами, отнесенными к одной и той же ячейке в схеме классификации, вдруг обнаруживаются различия, несовместимые с их совместным происхождением (Морен и Голдстейн, 1977). Все это показывает, что классификация метеоритов нуждается в дальнейшей разработке.

Хондриты. Более 90% каменных метеоритов содержат округлые зерна — *хондры* и называются *хондритами*. Хондриты выделены в особый класс метеоритов с наиболее многочисленными представителями.

Иногда хондры бывают хорошо видны на поверхности разлома метеоритов, но чаще обнаруживаются только на полированной поверхности (рис. 2). Размеры хондр различны — от микроскопических до сантиметровых. Хондры занимают значительный объем в метеорите (иногда до 50%). Они связаны цементирующей мелкозернистой мас-

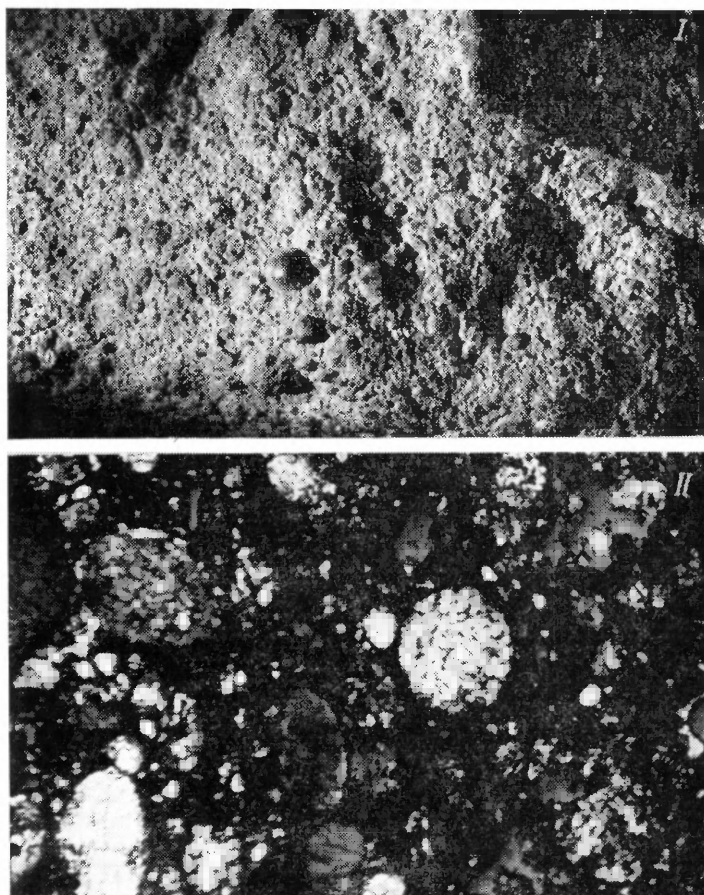


Рис. 2. Хондры на поверхности разлома метеорита Саратов (I) и на полированной поверхности метеорита Горловка (II). Архив Комитета по метеоритам АН СССР.

сой — *матрицей*, состав которой нередко идентичен со средним составом хондр.

Прочность хондритов различна. Из некоторых хондры легко выкрашиваются при малейшем усилии, и метеориты буквально рассыпаются в руках. Остается неясным, как

такие хондриты прошли сквозь земную атмосферу и упали на земную поверхность как целое.

По цвету хондриты обычно серые, но встречаются и почти черные и очень светлые. Они не имеют слоистости и крупнокристаллической структуры, характерной для многих земных пород. Сами же хондры, происхождение которых не ионято до сих пор, присущи только метеоритам и не встречаются больше нигде.

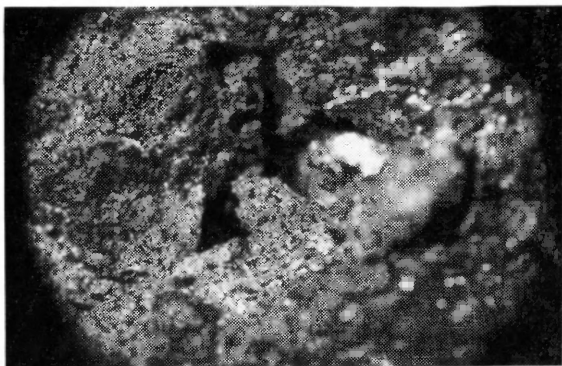


Рис. 3. Типичные поры миллиметровых размеров на поверхности разлома метеорита Горловка. Архив Комитета по метеоритам АН СССР.

Вещество хондритов плотное (от 2 до $3,7 \text{ г/см}^3$), но иногда содержит довольно крупные поры неправильной формы (рис. 3).

Хондриты содержат менее 30% никелистого железа, которое присутствует в виде мелких частиц неправильной формы (рис. 4). Изредка они достигают миллиметровых размеров. Встречаются и металлические шарики (которые иногда называют металлическими хондрами).

Большая же часть вещества хондритов — это железомagneзиальные силикаты. И хондры, и матрица сложены кристаллическими минералами или частично раскристаллизованным стеклом. На долю сульфидов (представленных в основном троилитом) и других минералов вещества приходится немного. Минералогический состав хондритов,

как и метеоритов других классов, приводится в Приложении 2.

Довольно долго, пока методы анализов были несовершенны, казалось, что все хондриты очень сходны (почти идентичны) по содержанию металлов, а отличаются лишь по форме присутствия их в веществе метеоритов: например

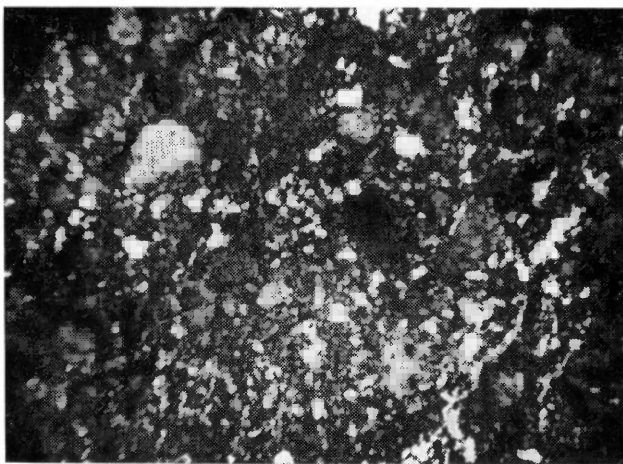


Рис. 4. Металлические частицы на полированной поверхности метеорита Горловка (белые в отраженном свете). Архив Комитета по метеоритам АН СССР.

в одних хондритах почти все входящее в них железо находится в металлическом состоянии (металлической фазе), и тогда силикаты оказываются бедны железом и богаты магнием, а в других хондритах много железа находится в силикатах и мало в металлической фазе, так что в металлических частицах оказывается относительно много никеля. Это позволило шведскому химику А. Норденшельду еще в 1878 г. предположить, что все хондриты образовались из одного и того же первичного вещества, однородного по составу, в котором все железо было первоначально окислено. Разное содержание металла в разных хондритах он связывал с разной степенью восстановления железа в последующих процессах.

Совершенствование техники анализов показало, однако, что хондриты отличаются одни от других и по общему содержанию железа. В сочетании со степенью окисленности железа это позволило разделить хондриты на несколько групп (рис. 5). К группе E-хондритов отнесли хондриты, в которых почти все железо находится в металлической фазе. В силикатах его мало, и в соответствии с этим

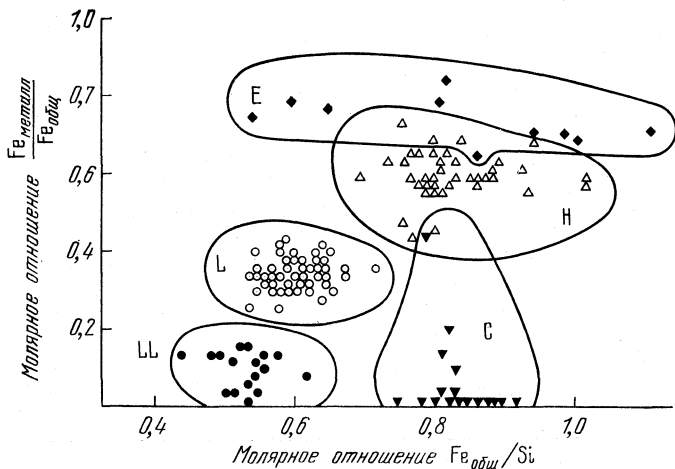


Рис. 5. Содержание железа и степени его окисления в 130 хондритах.

оливины этих силикатов представлены почти чистым энстатитом (почему такие хондриты и называют энстатитовыми). Некоторые исследователи делят E-хондриты на подгруппы E1 и EII.

Высокое содержание как общего, так и металлического железа характеризует H-хондриты (от high — высокий), низкое содержание того и другого характеризует L-хондриты (от low — низкий). Очень малое количество металлического железа при низком общем его содержании характеризует LL-хондриты. Группы H, L и LL близки к группам бронзитовых, гиперстенных и амфотеритовых хондритов в древних классификациях, где хондриты различались по характерному для них минералу. Три

группы хондритов, H, L и LL, объединяют в подкласс обыкновенных хондритов.

Еще одна группа хондритов, а именно С-хондриты (от carbonaceous — углистый) содержат много общего железа, но почти все оно находится в силикатах. С-хондриты делят на три подгруппы: CI, CII и CIII.

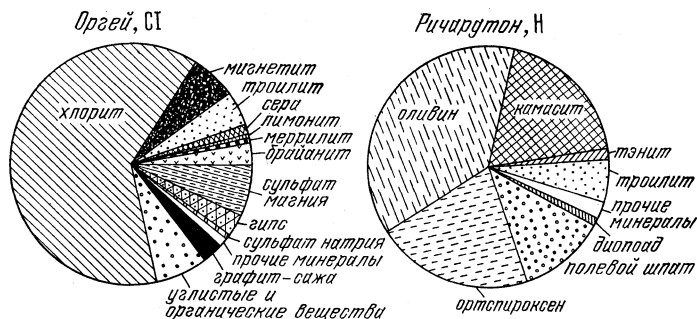


Рис. 6. Минералогический состав углистого метеорита Оргей, CI и обыкновенного хондрита Ричардтон, H.

Углистые хондриты содержат водосодержащие минералы, представляющие собой гидратированные силикаты (серпентин, хлорит и др.), а также органические соединения. В углистых метеоритах типа CI аморфные гидратированные силикаты (стекло) занимают основной объем (рис. 6). Дегидратированных силикатов нет. Эти метеориты представляют собой исключение среди хондритов: они не содержат хондр, а состоят словно из одной матрицы. В углистых метеоритах CII содержится уже только 10—15% связанной воды и в виде хондр присутствует 10—30% оливина и пироксена. Но в них тоже очень много стекла. В метеоритах CIII воды всего около 1%, преобладают оливин и другие дегидратированные силикаты. В небольших количествах присутствует никелистое железо.

Углистые метеориты — необычайно темные (что оправдывает их название, так как они вовсе не отличаются от других хондритов особенно высоким содержанием углерода). Темный цвет им придает мелкодисперсный рассеянный в матрице магнетит Fe_3O_4 . Присутствие связанной воды

заметно снижает плотность углистых метеоритов: от $3,2 \text{ г/см}^3$ в метеоритах СIII до $2,2 \text{ г/см}^3$ в метеоритах CI.

Что касается обыкновенных и энстатитовых хондритов, то они вовсе не содержат воды, а стекла в них значительно меньше.

Важной особенностью хондритов является их химический состав. Если исключить из рассмотрения такие летучие элементы, как Н, Не, О и т. д., то окажется, что химический состав хондритов (элементный) необычайно близок к составу Солнца (известному из спектральных исследований солнечной атмосферы): не только основные элементы, но и примесные содержатся в хондритном веществе в тех же соотношениях. Этим хондриты резко отличаются от горных пород Земли. Под влиянием магматической дифференциации, протекавшей в прошлом на Земле, и под влиянием других процессов (например, метаморфизма) на Земле произошла дифференциация вещества. В частности, она проявилась в том, что вместе с основными элементами произошло разделение и примесных элементов: литофильные элементы (Se, Sr, Rb, Ba, Ce, Cs, Th, U и др.), халькофильные элементы (Cu, Zn, Sn, Pb, Ag, Hg, Cd, In и др.) и сидерофильные элементы (Ga, Ge, Ru, Pt, Pd, Os, Ir, Rh и др.) обнаруживают сродство с минералами, богатыми кислородом, серой и железом соответственно и находятся именно в этих минералах. В результате горные породы земной коры состоят целиком из литофильных элементов, халькофильные элементы концентрируются в небольших областях рудных месторождений, а сидерофильные элементы в коре практически отсутствуют. В хондритах же все они присутствуют в тех же соотношениях, что и в солнечном веществе. Это означает, что хондриты, во-первых, образовались из вещества солнечного состава и, во-вторых, не подвергались дифференциации. Различия в содержании некоторых элементов (например, упоминавшиеся различия в содержании железа) велики и не меняют этого вывода. Они лишь указывают, что исходное вещество, пошедшее на образование хондритов разных групп, было слегка различным (вероятно, подверглось незначительному фракционированию еще в протопланетном облаке).

Углистые метеориты CI представляют собой образчики вещества, не измененного со времени аккумуляции никаки-

ми тепловыми процессами: они не переживают сколько-нибудь сильного нагрева и уже при температуре 400—500 °К их силикаты начинают терять воду. Предполагают, что оливины и нироксены в углистых метеоритах СII и СIII появились в результате такого слабого нагрева. Но нагрев не привел к заметной диффузии, так что минералы остались неравновесными (их состав не выравнен диффузией), а их текстура хорошо выражена. Из-за того, что нагрев был слабый, не произошла и раскристаллизация стекла.

Вряд ли можно сомневаться, что хондриты других групп образовались из вещества, сходного с веществом углистых метеоритов. Однако большая часть обыкновенных и энстатитовых хондритов обнаруживает следы значительных тепловых воздействий (метаморфизма). Границы хондр оказываются размытыми, иногда они едва различимы. При этом силикаты близки к равновесию, как и металл; стекла мало. В. Ван-Шмус и Дж. Вуд (Вуд, 1971) разделили хондриты по степени проявления метаморфизма на шесть *петрологических типов*, обозначив их арабскими цифрами, которые принято добавлять к обозначению группы хондрита. Позднее к ним был добавлен тип 7. Углистые метеориты СI отнесены к петрологическому типу С1, метеориты СII — к типу С2, метеориты СIII — к типу С3. К типу 3 отнесены и те хондриты из числа обыкновенных и энстатитовых, которые обладают хорошо выраженной текстурой и обнаруживают лишь едва заметные следы метаморфизма, к типу 6 — хондриты с редкими хондрами, едва различимыми на фоне кристаллической матрицы, обладающие крайней степенью метаморфизма. Стекол в таких хондритах нет: все стекло раскристаллизовано. Тип 7 содержит лишь реликты хондр (такое вещество встречается очень редко).

Железные метеориты и ахондриты. Железные метеориты почти целиком состоят из никелистого железа и содержат небольшие количества аксессуарных минералов. Изредка встречаются железные метеориты, содержащие до 20% силикатов и/или троилита. Они богаты сидерофильными элементами и почти совсем лишены литофильных.

Большинство железных метеоритов обладает удивительной структурой: они состоят из четырех систем параллельных камаситовых пластин (с низким содержанием никеля ~ 6—7%) с прослойками, состоящими из тэпита (30—

50% никеля) и тонкозернистой смеси камасита и тэнита. Иногда толщина пластин камасита составляет доли миллиметра, иногда сантиметры, но для каждого данного метеорита характерна своя толщина этих пластин. Если полированную поверхность распила железного метеорита протравить разбавленной кислотой, то из-за разной скорости травления камасита и тэнита внутренняя структура метеорита проявится в виде характерных *видманштеттеновых фигур*, названных в честь А. де Видманштеттена, первым наблюдавшим их в 1808 г. Они представляют собой своеобразный геометрический узор сложного переплетения (рис. 7). Видманштеттеновы фигуры обнаруживают только в метеоритах. Лишь в последние годы с трудом удалось получить в лабораториях сходные с ними фигуры микроскопических размеров.

Первые классификации железных метеоритов основывались на их структуре. Метеориты, обладающие видманштеттеновыми фигурами, назвали октаэдритами, так как образующие эти фигуры камаситовые пластины располагаются по граням октаэдра. В зависимости от толщины камаситовых пластин d среди октаэдритов различали

очень грубоструктурные	$d > 3,3$ мм,
грубоструктурные	$1,3 < d < 3,3$ мм,
среднеструктурные	$0,5 < d < 1,3$ мм,
тонкоструктурные	$0,2 < d < 0,5$ мм,
очень тонкоструктурные	$d < 0,2$ мм.

Некоторые железные метеориты не обладают октаэдритовой структурой и не дают видманштеттеновых фигур. К ним относятся метеориты с низким содержанием никеля, состоящие из одного камасита и обычно представляющие собой монокристаллы камасита размерами иногда более 50 см. Их называют гексаэдритами, так как их структура целиком определяется кубической кристаллической решеткой. Иногда выделяют метеориты, промежуточные между октаэдритами и гексаэдритами, и называют их гексоктаэдритами. И они и сами гексаэдриты встречаются редко.

Еще один редкий тип железных метеоритов — атакситы (что значит «лишенные порядка»), не имеющие какой-либо закономерной структуры. Среди них различают «бедные никелем» (около 6% Ni) и «богатые никелем» (обычно 9—20% Ni, но иногда и 30—60% Ni).

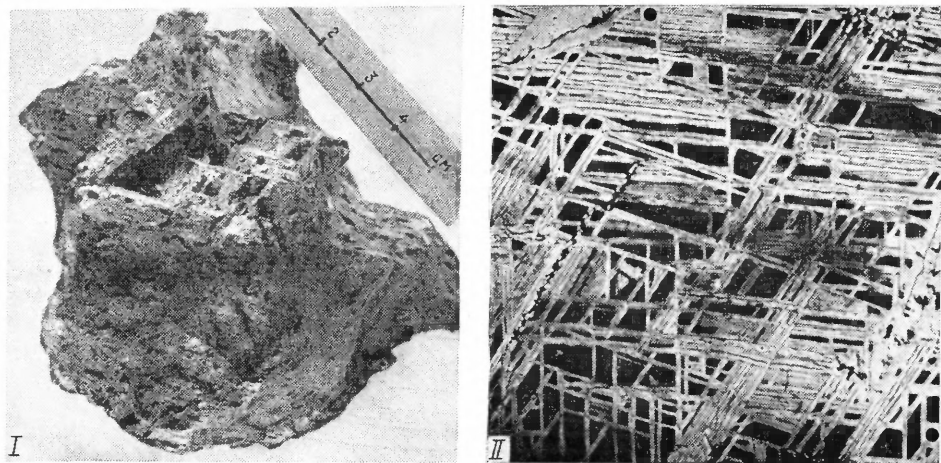


Рис. 7. Железный метеорит Этвекинот. *I* — общий вид метеорита. На поверхности разлома обнаруживается пластинчатая структура метеорита. *II* — Видмаштеттевы фигуры на протравленной поверхности распила того же метеорита. Архив Комитета по метеоритам АН СССР.

добавлением прописных букв. Так как классификация создавалась постепенно, то выявлялись новые группы, а старые дробились. При этом сходные обозначения групп (например, IIIA и IIIC) не несут особой смысловой нагрузки и обозначают не подгруппы, а лишь эквивалентные группы.

Процессы, которые привели бы к созданию подобных групп с дискретным содержанием сидерофильных элементов, неизвестны, и потому предполагается, что метеориты разных групп сформировались в разных родительских телах из слегка разного исходного вещества. Лишь между некоторыми группами метеоритов, возможно, существует генетическая связь (Явнель, 1978).

Между химическими и структурными группами железных метеоритов нет однозначной связи. Но метеориты, входящие в одну и ту же химическую группу, обладают, как правило, сходной структурой. Это проявляется в характерной для группы толщине камаситовых пластин:

в группе IA	$1,0 < d < 3,1$ мм,	в группе IIIA	$0,9 < d < 1,3$ мм,
» IB	$0,01 < d < 1,0$ мм,	» IIIB	$0,6 < d < 1,3$ мм,
» IC	$d < 3$ мм,	» IIIC	$0,2 < d < 0,4$ мм,
» IIA	$d > 50$ мм,	» IIID	$0,01 < d < 0,05$ мм,
» IIB	$5 < d < 15$ мм,	» IIIE	$1,3 < d < 1,6$ мм,
» IIIC	$0,06 < d < 0,07$ мм,	» IIIF	$0,5 < d < 1,5$ мм,
» IID	$0,4 < d < 0,8$ мм,	» IVA	$0,25 < d < 0,45$ мм,
» IIE	$0,7 < d < 2$ мм,	» IVB	$0,06 < d < 0,03$ мм.

Как мы увидим в дальнейшем (§ 8), это свидетельствует о том, что структура метеоритов одной и той же химической группы формировалась в сходных температурных условиях. Обнаруживается сходство между метеоритами одной и той же группы и в других отношениях (см. ниже). Это позволяет приписывать им совместное происхождение. Но иногда такая трактовка химических групп метеоритов встречается с большими трудностями (Мореп и Голдстейн, 1977).

Не вызывает никаких сомнений, что железные метеориты являются продуктом дифференциации (возможно, продуктом магматической дифференциации) вещества. Исходное же вещество было, вероятно, сходным с веществом солнечного состава и веществом хондритов.

Если вещество хондритного состава расплавить, то образуются две несмешивающиеся жидкости: металлическая фаза, по составу очень похожая на состав железных метеоритов, и силикатная фаза. Состав последней сходен с

составом класса каменных метеоритов, называемых ахондритами за то, что они не содержат хондр.

Ахондриты составляют около 10% каменных метеоритов. Они бедны железом и сидерофильными элементами. Большинство ахондритов в целом сходны с изверженными горными породами Земли и Луны, прошедшими магматическую дифференциацию. В связи с этим предполагается, что ахондриты образовались в том процессе дифференциации, который дал и железные метеориты, и что исходным веществом было вещество хондритного состава.

Ахондриты делят на группы по минералогическому составу. Названия групп образованы от названия основного минерала или от названия метеорита — представителя группы. Это обриты (Au), в которых 97% вес. составляет ортоэнстатит, уреилиты (Ure), состоящие на 85% из оливина, диогениты (Dio), состоящие на 95% из ортопироксена, говардиты (Ho), содержащие 40—80% ортонироксена, и эвкриты (Eu), содержащие 40—80% нижонита. Столь сильные различия в минералогическом составе влекут за собой и различия в химическом составе ахондритов. Различными оказываются содержания Fe, Mg, Ca, что отражает степень дифференциации вещества.

Железо-каменные метеориты. Железо-каменные метеориты состоят наполовину из силикатов, наполовину из металла. Они обладают уникальной структурой, не встречающейся нигде, кроме метеоритов (рис. 9). Эти метеориты представляют собой либо металлическую губку, крупные (до нескольких сантиметров) «поры» которой заполнены силикатами, либо силикатную губку со столь же крупными порами, заполненными металлом, а иногда троилитом. Первые называются палласитами (по названию метеорита Палласово Железо), вторые — мезосидеритами.

Металл железо-каменных метеоритов — это никелистое железо, по составу сходное с веществом железных метеоритов. На его протравленной поверхности хорошо видны видманштеттеновы фигуры, свидетельствующие о том, что никелистое железо обладает октаэдритовой структурой. Силикаты палласитов на 99% состоят из оливина (часто крупные кристаллы) и близки к веществу уреилитов. Силикаты мезосидеритов представлены в основном ортопирокседами (40—80%) и близки к веществу говардитов. Очевидно, как металлическая, так и силикатная часть

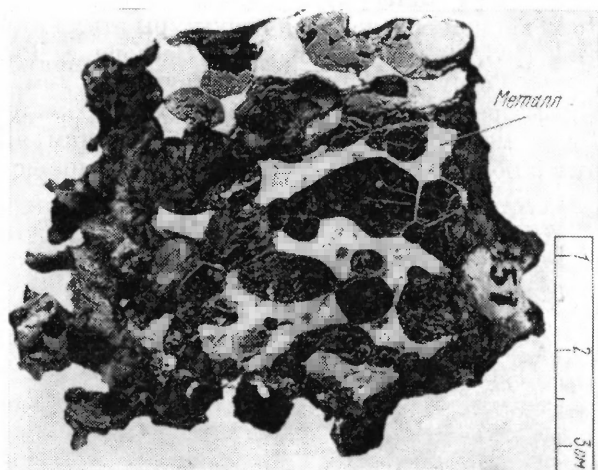


Рис. 9. Железо-каменный метеорит Палласово Железо. Полированная поверхность распила. Архив Комитета по метеоритам АН СССР.

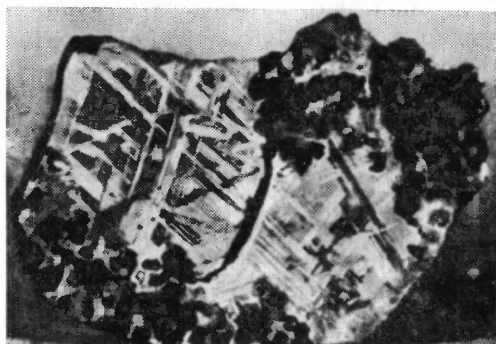


Рис. 10. Метеорит Бренгам. Полированная поверхность распила.

железо-каменных метеоритов подверглись дифференциации. Но механизм образования структуры этих метеоритов неясен (§ 8, 9). По мнению Дж. Вассона и Дж. Везерилла, эти структуры свидетельствуют о том, что в период дифференциации в родительских телах метеоритов на границе между еще жидким металлическим ядром и силикатной оболочкой этих родительских тел происходили

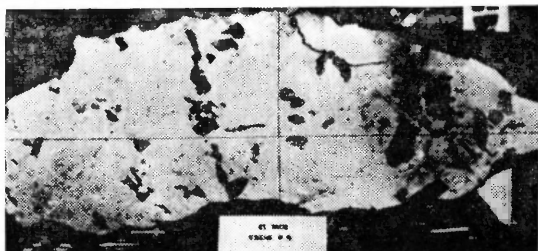


Рис. 11. Железный метеорит с силикатными включениями Эль Тако.

мощные процессы, приводящие к перемешиванию вещества. Причиной такого перемешивания могло быть уменьшение объема начинающего затвердевать ядра.

Очень редко встречаются метеориты, часть которых состоит из «железного метеорита», а часть из «железо-каменного» (рис. 10). Это показывает, что железо-каменные метеориты действительно образовались по соседству с железными.

Раньше к числу железо-каменных метеоритов относили метеориты, содержащие $\lesssim 20\%$ силикатного вещества. Теперь их относят к железным метеоритам с силикатными включениями (группы IA и IV железных метеоритов). Их особенностью является то, что каменистое вещество их включений имеет хондритный недифференцированный состав (подробнее см. § 8, 9). Один из представителей этих метеоритов показан на рис. 11.

В таких метеоритах встречается хондритное вещество аномального состава. Так, в метеорите Нечаево оно содержит необычайно много мелкодисперсного металла, и ради него в схему классификации следовало бы ввести группу НН.

§ 3. Возрасты метеоритов

Вещество метеоритов всех классов сформировалось в их родительских телах $(4,6-4,7) \cdot 10^9$ лет назад. К этому времени закончилась дифференциация вещества (в тех случаях, когда она имела место). Такой возраст метеоритного вещества установлен на основании анализа содержаний радиоактивных изотопов и их продуктов распада.

Один из таких радиоактивных изотопов Rb^{87} (с периодом полураспада $47 \cdot 10^9$ лет) распадается, давая стабильный изотоп Sr^{87} . Очевидно, чем дольше длился распад Rb^{87} , тем больше накопилось Sr^{87} . Но часть Sr^{87} могла войти в метеоритное вещество с самого начала. Поэтому определяют не просто содержания Rb^{87} и Sr^{87} , а их отношение к содержанию стабильного изотопа Sr^{86} , который не разрушается и не создается в метеоритном веществе никакими процессами в заметной степени. При этом неявно предполагают, что изотонный состав стронция в исходном веществе, из которого образовались родительские тела метеоритов, всюду в протопланетном облаке был одинаковым. В этом случае Rb^{87}/Sr^{86} является мерой содержания Rb^{87} , сохранившегося к настоящему времени, а Sr^{87}/Sr^{86} мерой количества Rb^{87} , который распался к настоящему времени, а следовательно, мерой длительности распада.

Определение этих отношений для ряда метеоритов показало, что на диаграмме $Sr^{87}/Sr^{86} - Rb^{87}/Sr^{86}$ точки, соответствующие разным метеоритам, располагаются вдоль прямой (рис. 12). Прямая пересекает ось ординат в точке, соответствующей начальному содержанию $Sr^{87}/Sr^{86} = 0,70$ в исходном веществе.

Очевидно, в начальный момент точки, соответствующие разным метеоритам, находились на горизонтальной прямой с $Sr^{87}/Sr^{86} = 0,70$. За время, протекшее с того момента, точки сместились на диаграмме вверх тем сильнее, чем больше рубидия оказалось в сформировавшемся веществе. Это и привело к тому, что в настоящее время они расположились вдоль прямой, наклон которой как раз и определяет промежуток времени, протекший со времени формирования метеоритного вещества.

Трудно допустить, что в исходном веществе, которое пошло на постройку родительских тел метеоритов, содержание Rb^{87} не было одинаковым. То, что к моменту, когда

заключилось формирование метеоритного вещества, оно оказалось разным, указывает, что до этого произошло событие, закончившееся перераспределением рубидия. Таким событием могла быть дифференциация вещества. Рубидий является довольно летучим элементом и мог теряться в разной степени из метеоритного вещества в

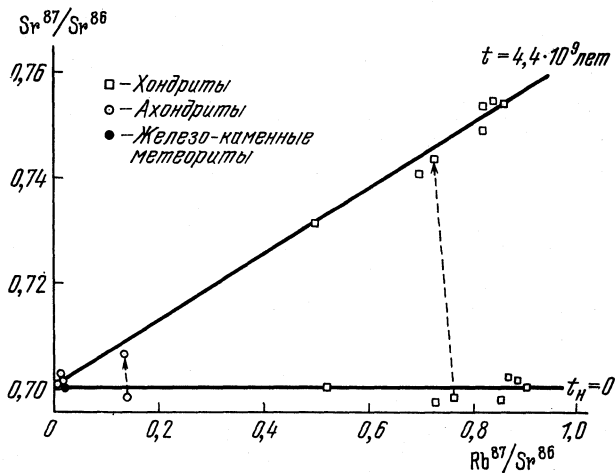


Рис. 12. Современные и начальные содержания Rb^{87} и Sr^{87} в метеоритах разных классов, нормированные к содержанию Sr^{86} . Из-за большого периода полураспада Rb^{87} его содержание за 4,5 млрд. лет уменьшилось всего на $\sim 6\%$.

зависимости от степени его нагрева. Поэтому железные метеориты и ахондриты, подвергшиеся сильной дифференциации, потеряли почти весь рубидий и оказались на диаграмме на рис. 12 у самой пачала координат.

Тот же возраст получают, используя радиоактивные изотопы U^{235} и U^{238} (с периодами полураспада $0,71 \cdot 10^9$ лет и $4,55 \cdot 10^9$ лет соответственно) и их дочерние стабильные изотопы Pb^{207} и Pb^{206} . Из-за различий в периодах полураспада U^{235} и U^{238} накопление Pb^{207} и Pb^{206} идет в метеоритном веществе с разной скоростью, так что отношение Pb^{207}/Pb^{206} с течением времени меняется и может использоваться для оценки возраста метеоритного вещества (или времени, прошедшего после дифференциации свинца и урана, если эта дифференциация имела место). Одинаковые значения

Rb-Sr- и U-Pb-возрастов показывают, что дифференциация как рубидия, так и свинца и урана произошла в едином процессе.

Если при определении возраста использовать радиоактивные изотопы и их дочерние газообразные продукты распада (например, $K^{40} \rightarrow Ar^{40}$ и $U^{235}, U^{238}, Th^{232} \rightarrow He^4$), то получатся гораздо меньшие значения возраста, причем зависящие от того, какой получается дочерний газообразный продукт, и разные для разных метеоритов.

Это можно объяснить, предположив, что метеоритное вещество некоторое время находилось в теплом (или горячем) состоянии. Поскольку родительские ядра радиоактивных изотопов входят в состав кристаллических минералов, дочерние ядра газообразных продуктов распада оказываются вкочленными в кристаллическую решетку минерала. Покинуть вещество они могут, лишь выбравшись сначала из кристалла путем решеточной диффузии. Скорость же этой диффузии сильно зависит от температуры и от размеров диффундирующих атомов. Ar^{40} может ускользать из минералов при температурах $\geq 250^\circ C$, а меньшие по размерам ядра He^4 — при температурах $\geq 100^\circ C$.

Поэтому анализ содержаний Ar^{40}/K^{40} и He^4/U , Th дает длительность накопления Ar^{40} и He^4 лишь в холодном или теплом веществе метеоритов, или так называемый возраст газодержания. Как правило, K-Ar- и U, Th-He-возрасты получаются существенно ниже Rb-Sr- и U-Pb-возрастов, свидетельствуя о длительном остывании вещества после дифференциации. При этом, как и следовало ожидать, U, Th-He-возраст оказывается обычно ниже K-Ar-возраста (рис. 13).

Этим методом удалось выявить группу около 30 хондритов L-группы с одинаковым, но очень низким возрастом газодержания — около $0,6 \cdot 10^9$ лет. Э. Андерс (1964, 1965) показал, что вещество этих метеоритов характеризуется и другими сходными признаками и интерпретировал это как указание на то, что оно подверглось сильному нагреву в недрах родительского тела в результате катастрофического столкновения в межпланетном пространстве с другим телом. В результате ранее накопленные Ar^{40} и He^4 были полностью потеряны, так что «радиоактивные часы» остановились и лишь после остывания вещества «были пущены» снова.

Малые возрасты газодержания получаются и для других метеоритов, причем U, Th-He-возраст оказывается зачастую на 1—2 млрд. лет ниже K-Ar-возраста. Это может быть связано с многократным, но несильным нагревом вещества при столкновениях в межпланетном пространстве, когда He⁴ теряется в большей степени.

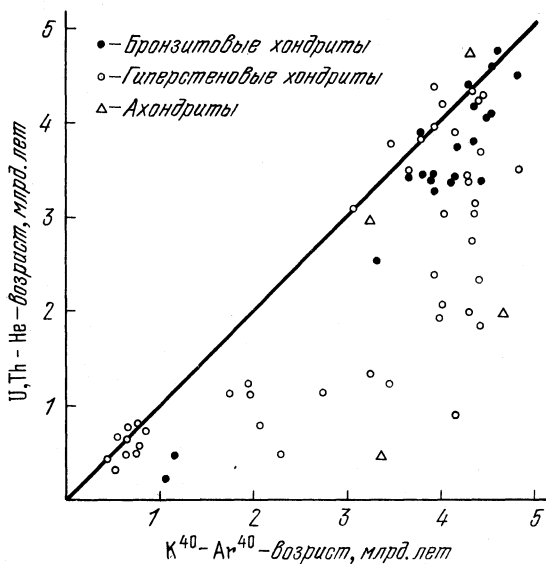


Рис. 13. Возрасты газодержания метеоритов разных классов.

Еще одно событие, датируемое в истории метеоритов, — момент отделения метеорита от его родительского тела. Дело в том, что пока вещество метеорита находится внутри родительского тела, оно экранируется от действия космических галактических лучей. После отделения от родительского тела будущий метеорит пронизывается галактическими космическими лучами. Эти лучи представляют собой в основном поток высокоэнергичных протонов. Попадая в вещество метеорита, они вызывают ядерные реакции скалывания, что приводит к образованию разных изотопов (называемых космогенными). Зная интенсивность космических лучей и их продуктивность в образовании того или иного космогенного изотона (на основании лабораторных

данных по облучению разного рода мишеней потоком высокоэнергичных протонов), можно оценить длительность накопления космогенных изотопов или продолжительность самостоятельного движения метеорита в межпланетном пространстве, т. е. космический возраст метеорита.

Другой способ определения космического возраста метеоритов основан на способности галактических космических лучей создавать в метеоритном веществе треки. Высокоэнергичные протоны, пронизывая вещество, «пробивают» на своем пути тончайшие каналы — треки. В начале пути протона создаваемый им трек очень тонок: из-за большой энергии протон практически не взаимодействует с ядрами атомов метеоритного вещества, расположенными даже на расстоянии нескольких атомных номеров от траектории протона (заметим, что именно это и создает возможность реакций скалывания при «прямом» попадании протона в ядро). Однако даже слабое взаимодействие приводит к торможению протона, так что через несколько десятков сантиметров или несколько сантиметров (в зависимости от начальной энергии) протон, теряя энергию, начинает взаимодействовать с ядрами, мимо которых он пролетает, «раздвигая» их. Трек становится толще, и специальное травление уже может расширить его настолько, что трек станет виден под микроскопом.

Плотность треков пропорциональна времени их накопления при прочих равных условиях. Поэтому при известном распределении протонов по энергии в космических лучах можно получить ожидаемое распределение треков в зависимости от расстояния от облучаемой поверхности метеорита. Это позволит определить космический возраст метеорита.

Трудность заключается в том, что первичная облучаемая поверхность метеорита утрачивается в процессе абляции в земной атмосфере, и таким образом утрачивается нуль-пункт отсчета плотности треков. Эту трудность обходят, сравнивая с расчетной кривой значения плотности, полученные в разных точках метеорита, на разной глубине. Одновременно это позволяет определить доатмосферные размеры метеорита.

Строго говоря, та же трудность существует и при определении космического возраста метеорита по космогенным изотопам. Ее обходят таким же способом.

Космические возрасты метеоритов намного короче и возраста метеоритного вещества и возраста газодержания. Для каменных метеоритов они составляют 10^6 — 10^7 лет, а для железных метеоритов — на порядок больше (рис. 14). Это значит, что метеориты в виде небольших обломков

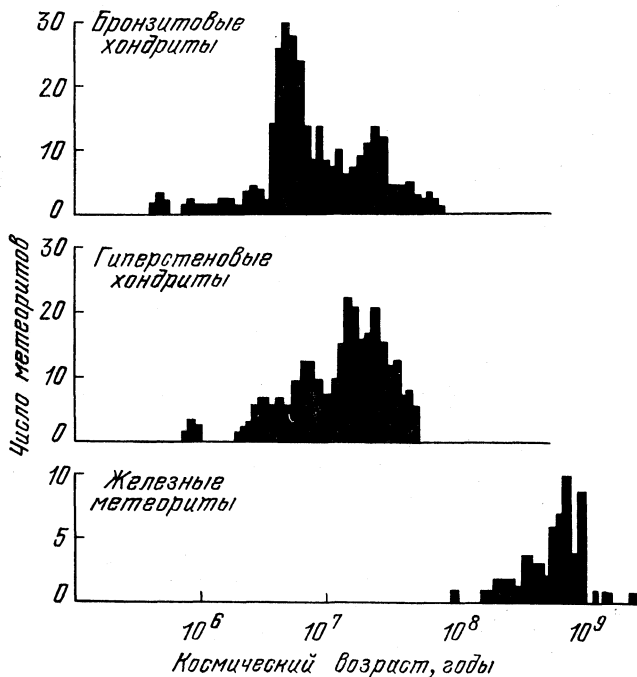


Рис. 14. Космические возрасты метеоритов разных классов.

двигались в межпланетном пространстве недолго. Основную часть своей жизни они провели в недрах родительских тел.

Самый большой космический возраст — 2,3 млрд. лет — имеет богатый никелем аномальный атаксит Дип Спрингс, массой 11,5 кг, найденный в США, а самый маленький возраст — около 25 тысяч лет — обыкновенный хондрит группы L5 Фармингтон, массой около 80 кг, выпавший в США в 1890 г.

Метеориты некоторых групп обладают сходными космическими возрастaми. Так, возраст почти всех железных метеоритов химических групп IIIA и IIIB равен 650 млн. лет. Это означает, что метеориты этих групп образовались в едином акте дробления своего родительского тела. Около значения 400 млн. лет концентрируются возрастaы железных метеоритов химической группы IVA, около значений 5 и 22 млн. лет — возрастaы большинства обыкновенных хондритов группы H, около значений 7 и 20 млн. лет — возрастaы многих обыкновенных хондритов группы L.

Следует заметить, что различия космических возрастaов у метеоритов, входящих в одну и ту же группу, само по себе не противоречит совместному происхождению их в одном и том же родительском теле: они могли «выколоться» в результате серии дроблений.

Как мы увидим в дальнейшем (§ 10), космические возрастaы метеоритов являются их важнейшей характеристикой и позволяют проследить за динамической эволюцией орбит родительских тел метеоритов.

Одной из загадок метеоритов является сильное различие космических возрастaов железных и каменных метеоритов. Правда, в последние годы было выявлено несколько железных метеоритов с малыми космическими возрастaами того же порядка, что у каменных метеоритов. Однако это не устранило проблему. Но прежде, чем перейти к обсуждению возможных причин этих различий, как и к обсуждению основных этапов формирования метеоритного вещества, рассмотрим, что представляют собой родительские тела метеоритов — астероиды.

Г л а в а II

АСТЕРОИДЫ

§ 4. Старые и новые открытия астероидов

Между орбитами Марса и Юпитера. Первый астероид, названный Церерой, был открыт сицилийским астрономом Дж. Пиацци 1 января 1800 г. случайно (во время работы по составлению каталога звезд) как объект 7^m . Пиацци наблюдал его в течение нескольких ночей, что позволило К. Гауссу определить его орбиту, разработав для этой цели специальный метод (известный теперь в небесной механике как метод определения орбиты по трем наблюдениям). Гаусс получил, что орбита Цереры лежит между Марсом и Юпитером (рис. 15), причем большая полуось орбиты $a = 2,8$ а. е. совпадает со значением, предсказываемым правилом Тициуса — Боде. Но к разочарованию тех, кто надеялся найти между Марсом и Юпитером большую планету, Церера оказалась всего лишь небольшой каменистой глыбой диаметром ~ 1000 км *).

28 марта 1802 г. немецкий врач Г. Ольберс, увлекавшийся астрономией, уже около месяца следивший за движением Цереры в области неба, предсказанной Гауссом, неожиданно обпаружил неподалеку от Цереры еще один астероид, получивший название Паллада. Оказалось, что Паллада движется по орбите, сходной с орбитой Цереры.

«Где тот прекрасный закономерный порядок, которому подчинялись планеты в своих расстояниях? — писал Ольберс в письме к И. Боде, имея в виду правило Тициуса — Боде. — Мне кажется, еще рано философствовать по этому поводу; мы должны сначала наблюдать и опре-

*) Современная оценка (см. § 7).

делять орбиты, чтобы иметь верные основания для наших предположений. Тогда, может быть, мы решим или по крайней мере приблизительно выясним, всегда ли Церера и Паллада пробегали свои орбиты в мирном соседстве, отдельно одна от другой, или обе являются только обломками, только кусками нрежней большой планеты, которую взорвала какая-нибудь катастрофа».

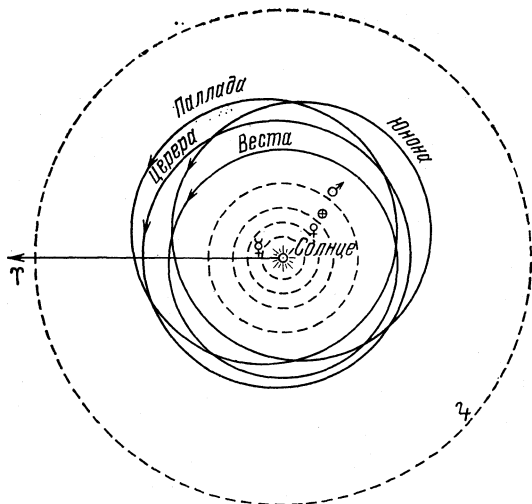


Рис. 15. Орбиты первых четырех астероидов — Цереры, Паллады, Юноны и Весты, совмещенные с плоскостью эклиптики.

Так в 1804 г. была высказана Ольберсом его знаменитая гипотеза о разрыве гипотетической планеты между Марсом и Юпитером и образовании астероидов — ее обломков.

Ольберс решил сам проверить свою гипотезу. Изучив положение орбит Цереры и Паллады в пространстве, он обратил внимание на то, что эти орбиты сильно сближаются в двух диаметрально противоположных точках. Полагая, что катастрофа произошла в одной из этих точек, Ольберс логично заключил, что все образовавшиеся обломки должны проходить через ту же точку, и принял

решение искать обломки не по всему небу, а в окрестностях этих точек. Из-за большого расстояния их от земной орбиты эти точки в период видимости по ночному небу оставались в пределах созвездий Девы и Кита. В апреле 1807 г. Ольберс написал Боде: «Следуя моей гипотезе, я вывел, что все астероиды, которых может оказаться еще много, должны пробегать северо-западную часть созвездия Девы и западную часть Кита. Верна или нет гипотеза, этого я пока не решаю; я просто пользуюсь ею для цели, которой служат вообще все гипотезы: руководствуюсь ею при наблюдениях.»

Третий астероид, — Юнона, — был открыт действительно в созвездии Кита 1 сентября 1804 г. К. Гардиингом. Сам Ольберс вел наблюдения в созвездии Девы. Наконец три года его терпеливых наблюдений увенчались успехом: 29 марта 1807 г. он открыл четвертый астероид — Весту.

В течение последующих долгих 40 лет не было открыто ни одного нового астероида. Ольберс умер, так и не узнав, что между Марсом и Юпитером действительно движется огромное множество астероидов, образующих кольцо, или пояс астероидов. Правда, они не проходят через места сближений орбит Цереры и Паллады. Гипотеза Ольберса не выдержала испытания временем, но это стало ясным лишь спустя более полутора веков, а пока... эти астероиды еще предстояло открыть.

Но вот в декабре 1845 г. в берлинских газетах появилось сообщение, что «8-го числа бывший почтовый чиновник из Дрейзена К. Генке» открыл пятый астероид, — Астрею, — а еще через полтора года, 1 июня 1847 г., он же открыл шестой астероид — Гебу. В том же 1847 г., американец Дж. Хемд открыл Ирис и Флору. В дальнейшем открытия астероидов следовали одно за другим. Наблюдения велись с помощью небольших и недорогих телескопов, доступных любителям. Астероиды обнаруживались в пределах довольно широкой полосы, опоясывающей все небо.

К 1891 г. визуальным методом с использованием небольших инструментов было открыто 322 астероида. Поиски становились, однако, все труднее, так как «запасы» сравнительно ярких астероидов иссякали. Теперь лишь изредка удавалось открыть довольно яркий объект. Та-

ким оказался, например, 471-й астероид, — Папагена, — около 8^m , который был открыт лишь в 1901 г.

Развитие фотографии позволило, начиная с 1900 г., для поисков астероидов применить астрографы, и к 1924 г. было известно уже около 1000 астероидов с хорошо определенными орбитами. Но не всегда число наблюдений оказывалось достаточным для определения орбиты, и открываемые астероиды терялись вновь. Так, в одном только 1931 г. из 398 открытых астероидов утеряно было почти $\frac{3}{4}$.

Долгое время одно из первых мест в мире по числу открываемых и наблюдаемых астероидов занимала Симеизская астрофизическая обсерватория, где одним только ее директором Г. Н. Неуйминым было открыто свыше 400 астероидов. Для 60 из них удалось определить орбиты.

Сначала астероиды называли именами божеств (как большие планеты), потом именами близких, знакомых, знаменитых людей. До недавнего времени соблюдалось правило: называть астероиды женскими именами, делая исключения для астероидов с необычными орбитами. Теперь от этого отказались.

В настоящее время астероиду сразу после открытия присваивается предварительное обозначение, содержащее год открытия (например, 1937 DA), а потом, если орбита астероида будет определена надежно, — постоянный номер и название. Следит за этим Планетный центр, который до 1978 г. находился в Цинциннати (США), а затем переместился в Смитсоновский институт. Сейчас число нумерованных астероидов приближается к 2000. Среди них Москва, Победа, Владилена (в честь В. И. Ленина), Гагарин, Королев, Чеботарев, Масевич и десятки других, названных в честь выдающихся советских людей.

Анализ движения многочисленных астероидов становился постепенно все более трудоемкой задачей. Было создано несколько мировых вычислительных центров. У нас в стране в 1919 г. возник Вычислительный институт в Ленинграде, преобразованный позднее в Астрономический институт, а в 1943 г. — в Институт теоретической астрономии (ИТА) АН СССР. Одной из его главных задач является организация и координация всех теоретических исследований по астероидам в СССР.

Со временем началось изучение физических свойств астероидов. Сначала анализировались цвет астероидов и характер изменений их блеска в зависимости от положения по отношению к Солнцу и Земле. В последнее время к этому добавились спектральные и другие методы (§ 7). Фотометрические исследования затруднялись тем, что наблюдения астероидов велись на разных инструментах, в разных погодных условиях. Качество результатов было различным, и часто они оказывались несравнимыми между собой. Возникла необходимость пересмотреть фотометрические данные по всем нумерованным астероидам. Эта колоссальная работа была проведена по инициативе известного американского астрофизика Дж. Койпера: в 1950—1952 гг. на обсерваториях Йеркской и Мак-Доналд с помощью 25-сантиметровой камеры дважды почти полностью была сфотографирована вдоль эклиптики полоса шириной 40° . Было снято 2000 пластинок, на которых оказались зафиксированы изображения находившихся в этой области астероидов до $14^m,5$. Этот фотометрический обзор получил название Мак-Доналдского обзора.

Спустя 10 лет фотометрический обзор астероидов был продолжен с целью получения информации о более слабых объектах. В сентябре—октябре 1960 г. на обсерватории Маунт Паломар (США) с помощью 125-сантиметровой камеры Шмидта было проведено систематическое фотографирование небольшой области, размерами $8 \times 12^\circ$, расположенной вблизи точки весеннего равноденствия. За два месяца было сфотографировано около 2200 астероидов вплоть до $\sim 20^m$, причем для 1811 из них удалось определить орбиты. Все вычисления проводились на Лейденской обсерватории. Этот обзор получил название Паломар-Лейденского обзора (Ван Хоутен и др., 1970; Ван Хоутен и др., 1971). Относящиеся к нему астероиды имеют специальное обозначение (например, 6344-PL). В связи с малой надежностью орбит они не включены в число нумерованных астероидов.

Астероиды, проникающие внутрь орбиты Марса. Орбиты большинства открытых астероидов лежат между орбитами Марса и Юпитера. Астероиды на орбитах, глубоко проникающих внутрь орбиты Марса и приближающиеся к орбите Земли, оставались неизвестны до самого конца прошлого века. Только 13 августа 1898 г. любитель астро-

номии Г. Витт в Берлине открыл астероид (433) Эрос *), движущийся по сильно эксцентричной орбите небольших размеров. В кольцо астероидов Эрос попадал лишь в районе афелия орбиты, проводя большую часть времени, как оказалось, вдали от кольца, в перигелии почти касаясь орбиты Земли.

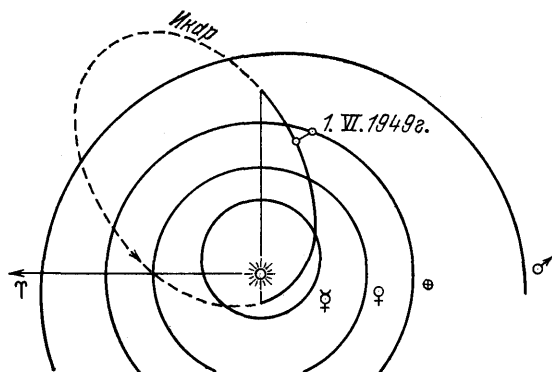


Рис. 16. Орбита Икара. Показаны положения Икара и Земли в момент открытия астероида.

В 1932 г. Э. Дельпорт в Уккле (Бельгия) открыл второй астероид с орбитой подобного типа — (1221) Амур. Еще через несколько месяцев был открыт (1862) Аполлон с еще более необычной орбитой, проникающей даже внутрь орбиты Венеры, а затем еще несколько подобных астероидов. Ближе других к Солнцу подходит (1566) Икар, открытый В. Бааде на Паломарской обсерватории в 1949 г. Перигелийное расстояние q орбиты Икара составляет всего 0,186 а. е., а размеры орбиты так малы ($a = 1,078$ а. е.), что, несмотря на ее большой эксцентриситет ($e = 0,827$), астероид не уходит от Солнца дальше $q' = 1,97$ а. е. (рис. 16).

Все известные приближающиеся к Земле астероиды очень малы: у большинства поперечник составляет всего несколько километров или сотен метров (§ 6). Поэтому

*) Здесь и далее в скобках перед названием астероида указан его номер.

они становятся доступны наблюдениям лишь в короткий период сближения. Открыть такие астероиды и даже пронаблюдать повторно при следующем сближении с Землей трудно не только потому, что период их видимости длится недолго, но и потому, что велика угловая скорость их перемещения среди звезд на небе, и потому, что, в отличие от астероидов кольца, они, приближаясь к Земле с разных сторон, проектируются на небесную сферу в самых разных местах, вплоть до полюсов мира.

Тем не менее начиная с 1973 г. на Паломарской обсерватории под руководством Э. Хелин с помощью 46-сантиметровой камеры Шмидта был начат систематический поиск астероидов, пересекающих орбиты планет земной группы. За три года было открыто несколько новых быстро движущихся объектов, среди которых оказалось два астероида (1976 AA и 1977 NB) на орбитах, большие полуоси которых меньше 1 ае.

К концу 1977 г. было известно около 50 астероидов, приближающихся к орбите Земли или проникающих внутрь нее. Они разделены на две группы — группу Аполлона с $q \leq 1$ а. е. и группу Амура с $q > 1$ а. е., названные по именам представителей групп. Орбиты этих астероидов отличаются от орбит подавляющего большинства тел, движущихся в кольце астероидов, малыми размерами, часто большими эксцентриситетами (до 0,88) и большими наклонками к эклиптике (до 64°).

Рассматривая открытия астероидов как случайные события, Ф. Уиппл (1967), а позднее Э. Шумейкер и др. (1976) и Л. Кресак (1978) методами теории вероятностей показали, что полное число астероидов групп Аполлона и Амура, как известных, так и неизвестных составляет несколько сотен или около тысячи.

На орбите Юпитера и за ее пределами. Через несколько лет после Эроса, в 1904 г., был открыт астероид (588) Ахилл, движущийся по огромной орбите далеко за пределами кольца астероидов, почти по орбите Юпитера. Он казался едва ли не самым удивительным астероидом.

Дело в том, что еще задолго до открытия первого астероида, во второй половине XVIII в., Лагранж, пытаясь решить задачу трех тел, нашел, что в системе трех гравитирующих тел (Солнце — планета — малое тело) существует пять точек (называемых теперь лагранжевыми точ-

ками), в которых все силы, действующие на тела, взаимно уравновешиваются. Три из них — L_1 , L_2 , L_3 — находятся на прямой, соединяющей Солнце и планету, а еще две — L_4 , L_5 — располагаются на орбите планеты, образуя с планетой и Солнцем равносторонние треугольники. Положение малого тела в точках L_1 , L_2 , L_3 неустойчи-

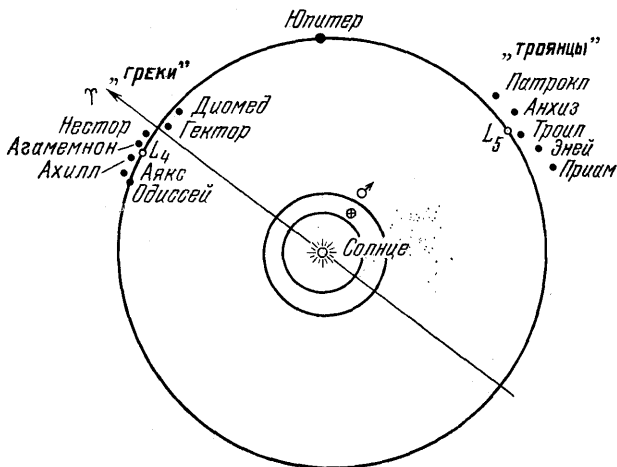


Рис. 17. Лагранжевы точки L_4 и L_5 в системе Солнце — Юпитер и некоторые Троянцы в их окрестностях. Положение астероидов показано на 18 сентября 1948 г. (По И. И. Путилину, 1953.)

но отношению к малым возмущениям (со стороны прочих тел), но в точках L_4 , L_5 оно может оказаться устойчивым. Сам Лагранж не верил в возможность осуществления такого случая в природе, потому что попасть в лагранжевы точки под действием сил тяготения практически невозможно: для этого потребовалось бы бесконечно большое время, поскольку по мере приближения к лагранжевым точкам силы, действующие на тело, быстро убывают.

Упомянутый астероид Ахилл был открыт вблизи точки L_4 в системе Солнце — Юпитер. Затем (ко времени Паломар-Лейденского обзора) было открыто еще около 20 астероидов до 14^m, движущихся у орбиты Юпитера в окрестностях точек L_4 и L_5 и получивших общее назва-

ние «Троянцы», так как все они пазваны в честь героев Троянской войны — греков и троянцев (рис. 17). Анализ снимков Паломар-Лейденского обсерватории позволил оценить число Троянцев, движущихся в окрестностях точки

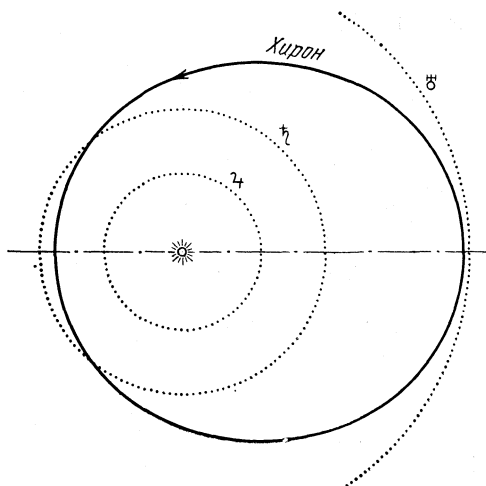


Рис. 18. Орбита Хирона.

L_5 и имеющих звездную величину вплоть до $20^m,6$, приблизительно в 700 (Ван Хоутен и др., 1970б).

Астероиды, орбиты которых лежали бы за пределами орбиты Юпитера, не были известны до 1977 г., хотя на основании общих космогонических соображений неоднократно высказывались предположения о возможности существования крупных тел между орбитами Юпитера и Сатурна, являющихся, как и астероиды, не вычерпанными планетами остатками протопланетных тел.

В конце 1977 г. на расстоянии 16,7 а. е. от Солнца, был открыт объект 1977 UB, названный Хироном. Его орбита лежит в основном за орбитой Сатурна (рис. 18). Период обращения Хирона составляет 50,7 года, большая полуось орбиты $a = 13,7$ а. е., эксцентриситет $e = 0,38$, наклон $i = 7^\circ$. В перигелии Хирон остается удаленным от Солнца на 8,5 а. е., в афелии уходит на расстояние 18,9 а. е. Размеры объекта оцениваются в 150—650 км.

§ 5. Кольцо астероидов

Движение типичных астероидов. 98% всех астероидов движется между орбитами Марса и Юпитера в прямом направлении по слегка эллиптическим орбитам малого и умеренного наклона, оставаясь в пределах огромного

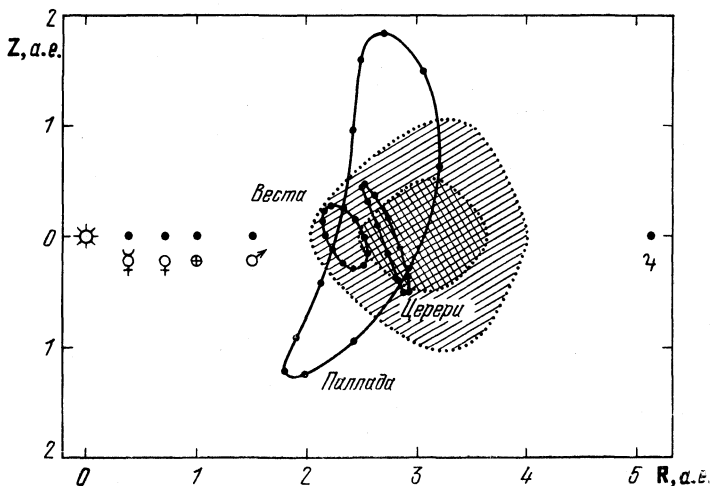


Рис. 19. Сечение кольца астероидов плоскостью RZ , перпендикулярной к плоскости эклиптики и проходящей через Солнце (заштрихованная область; редкая штриховка соответствует меньшей пространственной плотности астероидов). Показаны орбиты, которые описывают в этой плоскости Церера, Паллада и Веста (для каждого из этих астероидов рассматриваемая плоскость вращается вокруг Солнца вместе с астероидом). R — расстояние в плоскости эклиптики, Z — расстояние от этой плоскости (положительное в направлении к северному полюсу эклиптики). (По Л. Кресаку, 1977).

тора, называемого кольцом, или поясом астероидов*). Сечение этого тора плоскостью, перпендикулярной к плоскости эклиптики, показано на рис. 19.

*) Подробный анализ структуры кольца и обсуждение выводов о его эволюции на протяжении всей истории существования Солнечной системы приведены в книге «Малые планеты», вышедшей недавно под редакцией Н. С. Самойловой-Яхонтовой (М.: Наука, 1973). Мы ограничимся перечислением некоторых из установленных фактов, интересных с точки зрения понимания кольца астероидов как источника метеоритов.

Большие полуоси орбит астероидов кольца заключены в интервале $2,2 < a < 3,2$ а. е., периоды обращения — в интервале $3 < T < 9$ лет, средние суточные движения *) — в интервале $1200 > n > 400''$. Линейная (гелиоцентрическая) скорость движения астероидов — порядка 20 км/сек. Хаотическая компонента этой скорости равна 5 км/сек.

Эксцентриситеты орбит обычно лежат в пределах $0 < e < 0,2$ и редко превышают $0,4$. Заметим, однако, что даже при очень небольшом эксцентриситете в $0,1$ гелиоцентрическое расстояние астероида во время его движения по орбите меняется на несколько десятых а. е., а при $e = 0,4$ — на $1,5-3$ а. е., в зависимости от размеров орбиты.

Наклоны орбит к плоскости эклиптики составляют обычно от 5 до 15° , но и при наклоне в 10° астероид может отклоняться от плоскости эклиптики на $\sim 0,5$ а. е., а при наклоне в 30° — до $1,5$ а. е.

На рис. 19 показано, как по отношению к кольцу астероидов движутся Церера, Паллада и Веста.

Большой вклад в анализ структуры кольца астероидов сделал Г. А. Чеботарев (Чеботарев и Шор, 1973 и др.). Он разделил все астероиды кольца на плоскую и сферическую подсистемы с $i < 8^\circ$ и $i > 8^\circ$ соответственно. В плоскую подсистему вошло 48% всех астероидов. Ее представители обладают средними движениями от 1200 до $400''$. Это означает, что плоская подсистема простирается на всю ширину кольца. Из крупнейших астероидов к этой подсистеме относятся Веста, (10) Гигия и (19) Фортуна.

Сферическая подсистема охватывает 50% астероидов. Средние движения ее членов заключены в интервале $980-610''$, так что астероиды этой подсистемы движутся преимущественно в средней части кольца. К этой подсистеме относятся такие крупные астероиды, как Церера, Паллада, Юнона, (324) Бамберга, (511) Давида и (704) Интерамния.

Среди астероидов сферической подсистемы встречаются движущиеся по орбитам с огромным наклоном. Напри-

*) Среднее суточное движение равно средней угловой скорости движения астероида вокруг Солнца. Оно связано с периодом обращения, выраженным в сутках, простым соотношением $n = 2\pi/T$. Обычно n выражают в $^\circ/\text{сутки}$, или в $''/\text{сутки}$.

мер, у (944) Гидальго наклон орбиты достигает 43° . Удивление вызывает большой наклон орбиты Паллады (35°), который трудно объяснить с точки зрения аккумуляции такого крупного тела на сильно наклоненной орбите.

По среднему суточному движению астероиды разделены Г. А. Чеботаревым на пять групп. Многочисленные группы I, II и III состоят из астероидов, движущихся преимущественно во внешней, центральной и внутренней зонах кольца соответственно. В центральной зоне преобладают астероиды сферической подсистемы, тогда как во внутренней зоне $\frac{3}{4}$ астероидов являются членами плоской подсистемы.

По мере перехода от внутренней зоны к внешней становится все больше круговых орбит: если в группе III эксцентриситет $e < 0,14$ имеют всего 36% астероидов, то в группе II таких 44%, а в группе I — 60%. Возможно, это объясняется «чисткой» кольца Юпитером, которая оказалась более эффективной для тел, движущихся на меньшем расстоянии от Юпитера: тела на больших и эксцентричных орбитах могли, приближаясь к Юпитеру и испытывая сильные возмущения с его стороны, выметаться из кольца астероидов и даже из планетной системы.

Малопаселенные окраины кольца занимают группы А и В, примыкающие к группам I и III соответственно. У внешней окраины кольца движутся астероиды группы А с $440'' < n < 460''$ (выделенные в группу Гильды — по астероиду № 153) и с $n \approx 300''$ (Троянцы). Кроме них, в интервале $500'' > n > 300''$ известно еще лишь несколько астероидов.

У внутренней окраины кольца движутся быстрые астероиды группы В со средними движениями $1100 < n < 1200''$ и с периодами обращения около 3 лет. Некоторые из них близко подходят к орбите Марса.

Возмущения со стороны планет. Орбиты, по которым движутся астероиды, непрерывно меняются вследствие того, что астероиды постоянно испытывают возмущения со стороны планет, главным образом Юпитера. Поэтому их путь в пространстве представляет собой, вообще говоря, незамкнутые витки, укладываемые рядом друг с другом. (Лишь у некоторых астероидов, движущихся по орбитам, сближающимся с орбитами планет, витки могут иногда довольно резко отклоняться в сторону из-за силь-

ных возмущений, испытанных астероидом при тесном сближении с планетой.)

Планеты возмущают, конечно, движение не только астероидов, по и друг друга. Однако возмущения, испытываемые самими планетами, малы и практически не меняют взаимного расположения планетных орбит (благодаря чему сохраняется структура Солнечной системы) и не могут привести к столкновению планет друг с другом. Иначе обстоит дело с астероидами. Из-за своих больших эксцентриситетов и наклонов орбиты астероидов под действием планетных возмущений с течением времени меняются довольно сильно, если даже астероид и не испытывает тесных сближений с планетами.

Планетные возмущения приводят к непрерывному перемешиванию астероидов (и их орбит) и делают возможными столкновения астероидов друг с другом.

Особый интерес представляют так называемые вековые возмущения орбит астероидов на интервалах времени $> 10^3$ лет. При таких масштабах времени можно уже не рассматривать мгновенные положения астероида и планет на их орбитах: как в ускоренном фильме, астероид и планета оказываются как бы «размазанными» по орбитам. Становится целесообразным рассматривать их как «массивные» кольца, которые не обладают постоянной формой. Наклон кольца к плоскости эклиптики, где находятся планеты — источники возмущающих сил, приводит к тому, что орбита астероида ведет себя подобно волчку или гироскопу. Однако ситуация в случае орбиты астероида оказывается более сложной, чем в случае волчка или гироскопа, так как орбита астероида не является жесткой и ее форма меняется синхронно с изменением наклона. При этом большая полуось орбиты (а следовательно, и период обращения астероида вокруг Солнца) не меняется.

Вековые возмущения орбит можно представить как сумму колебаний (осцилляций) разного периода. Среди них, следуя терминологии, заимствованной из теоретической механики, различают осцилляции свободные и вынужденные.

Свободные осцилляции представляют собой осцилляции наименьшего периода. Член вековых возмущений, описывающий свободные осцилляции, содержит функции эксцентриситета e , наклона i и аргумента перигелия ор-

биты ω . Их колебания у астероидов происходят с периодом до $\sim 10^4$ лет.

При свободных осцилляциях орбита астероида вращается так, что нормаль к ней, восстановленная в том фокусе, где находится Солнце, описывает конус. При этом линия узлов вращается в плоскости эклиптики с постоянной скоростью по часовой стрелке.

Синхронные изменения e , i и ω в свободных осцилляциях, согласно М. В. Лидову (1961; Лидов и Ярская, 1974), могут быть приближенно описаны системой уравнений

$$(1 - e^2) \cos^2 i = \text{const} = C_1, \quad (1)$$

$$e^2 (0,4 - \sin^2 i \sin^2 \omega) = \text{const} = C_2, \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — некоторые постоянные величины, которые могут быть определены по элементам современной орбиты.

Анализ этих уравнений показывает, что дважды за период осцилляций, когда линия узлов проходит через перигелий (т. е. при $\omega = 0$ и 180°), достигается максимальный наклон i_{\max} и минимальный эксцентриситет e_{\min} . При этом перигелий орбиты располагается на эклиптике на максимальном расстоянии от Солнца q_{\max} . По мере отклонения линии узлов от линии апсид наклон орбиты убывает, а эксцентриситет возрастает, и перигелий, приближаясь к Солнцу, отклоняется от эклиптики. Это отклонение достигает максимума, когда линия узлов становится перпендикулярной к линии апсид (дважды за период, когда $\omega = 90$ и 270°) при минимальном наклоне i_{\min} , максимальном эксцентриситете e_{\max} и минимальном перигелийном расстоянии q_{\min} . У орбит с большим наклоном и эксцентриситетом амплитуда свободных осцилляций по e и i достигает больших значений (рис. 20).

Для приближенных расчетов свободных осцилляций орбит служит сетчатая номограмма (сложный абак), составленная на основании формул (1) и (2) и показанная на рис. 21. Принцип построения номограммы и правила пользования ею иллюстрирует схема, помещенная над номограммой. Линии основной номограммы представляют собой изолинии C_1 и C_2 при $\omega = 90^\circ$. Значения e и i , соответствующие этим изолиниям, указаны сбоку и снизу от номограммы (шкалы номограммы). Сверху к основной

номограмме пристроена вспомогательная, позволяющая по данным ω и i получать значения $i' = \arcsin(\sin^2 i \sin^2 \omega)$. На номограмме шкала со значениями $i = i'$ не мая.

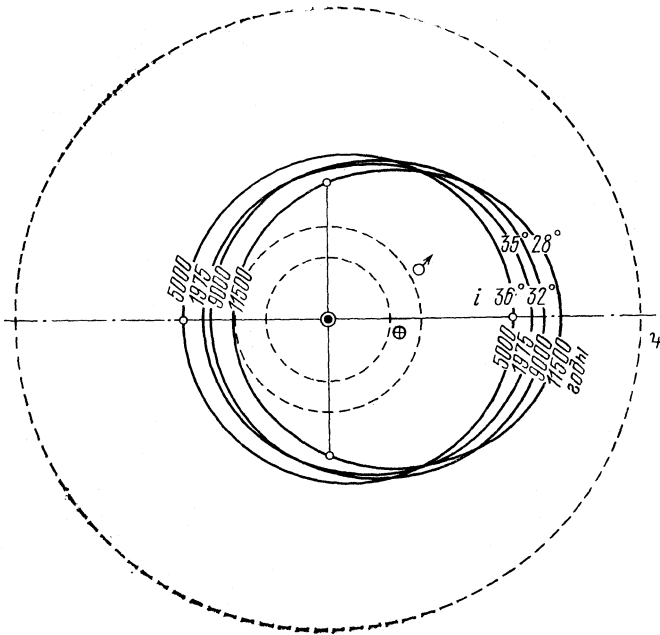


Рис. 20. Изменение формы и наклона эксцентричной и сильно наклоненной к эклиптике орбиты Паллады в ходе свободных осцилляций. Показаны последовательные орбиты с совмещенными линиями апсид. Кружками показаны линии узлов для экстремальной формы орбиты. (По данным Ф. Уингла и др., 1976).

Определение по номограмме синхронных значений элементов осциллирующей орбиты сводится к следующему. Войдя в номограмму со значениями элементов оскулирующей*) орбиты (которым мы припишем индекс «0»), а именно, e_0 , i_0 и ω_0 , получим, как показано на схеме рис. 21 вверху, точки 1 и 2. Проведем через них изолинии

*) Орбита, соответствующая мгновенному вектору гелиоцентрической скорости астероида на соответствующем гелиоцентрическом расстоянии.

C_1 и C_2 до взаимного пересечения пад изолинией e_0 в точке 3. Соответствующие этой точке значения эксцентриситета

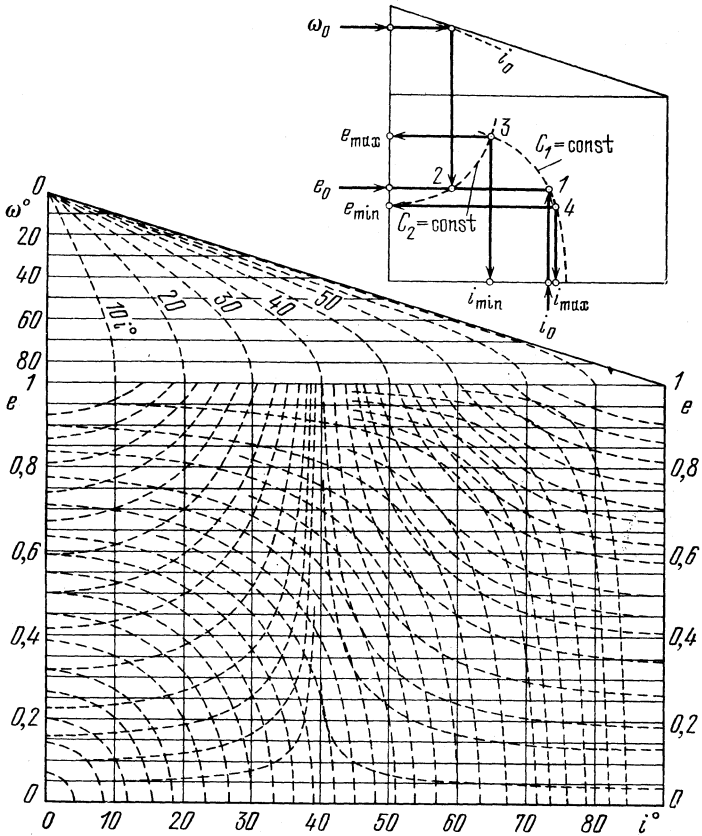


Рис. 21. Номограмма для расчета свободных осцилляций орбит по e и i . Вверху схема пользования номограммой.

и наклона, считанные со шкал e и i , дают значения максимального эксцентриситета e_{\max} и минимального наклона орбиты i_{\min} . Пересечение изолинии C_2 со шкалой e дает значение минимального эксцентриситета e_{\min} , а пересечение изолинии e_{\min} с изолинией C_1 в точке 4 определяет значение максимального наклона i_{\max} , которое мо-

жет быть считано со шкалы i . Таким образом, определяются экстремальные значения эксцентриситета и наклона орбиты в ходе свободных осцилляций орбиты.

Любые промежуточные значения e_n , i_n и ω_n , соответствующие одному и тому же моменту времени, можно определить, задавая произвольно значения e_n в интервале $e_{\min} < e_n < e_{\max}$ и находя точки пересечения изолинии e_n с изолиниями C_1 и C_2 , проведенными ранее, а затем, считывая значение i_n со шкалы i , а значение ω_n — со шкалы ω , поднявшись к ней с изолинии e_n , подобно тому как раньше мы снускались от ω_0 на изолинию e_0 . Поскольку $a = \text{const}$, можно по найденным e_{\min} , e_n , e_{\max} определить q_{\max} , q_n , q_{\min} из соотношения $q = a(1 - e)$.

Следующие члены вековых возмущений — компоненты вынужденных осцилляций — имеют все более увеличивающийся период колебаний, все большую амплитуду синхронных изменений эксцентриситета и наклона орбиты и характеризуются, кроме того, еще вращением линии апсид.

Люки Кирквуда. В 1866 г. американский астроном Д. Кирквуд, работавший в Смитсоновской обсерватории, обратил внимание на то, что в кольце астероидов нет астероидов с некоторыми определенными значениями среднего движения. На гистограмме распределения астероидов по n это проявляется в виде своеобразных провалов, которые теперь называются люками, или просветами, Кирквуда (рис. 22). Эти люки шириной в $10''$ и более разбивают кольцо астероидов, как плоскую, так и сферическую подсистемы, на ряд подколец. В плоской подсистеме таких подколец 12, в сферической 4.

Люки Кирквуда — это провалы в распределении лишь средних движений. Они существуют, конечно, и в распределении периодов обращения астероидов (поскольку $n = 2\pi/T$), и в распределении больших полуосей орбит (поскольку $a^3 \propto T^2$). Если же построить распределение мгновенных гелиоцентрических расстояний астероидов, то никаких люков не окажется: в кольце астероидов нет зон с малой пространственной плотностью тел на гелиоцентрических расстояниях, соответствующих люкам Кирквуда, потому что из-за эксцентриситета и наклона орбит астероиды большую часть времени проводят в «чужой» зоне. Г. Рессел и др. (1935) удачно охарактеризо-

вали ситуацию в кольце астероидов следующим образом: «Орбиты малых планет настолько пересекают друг друга и так занутаны между собой, что если бы они представляли собой проволочные кольца, то, подняв одно из них, мы подняли бы вместе с ним и все остальные, а также орбиты Юпитера и Марса.»

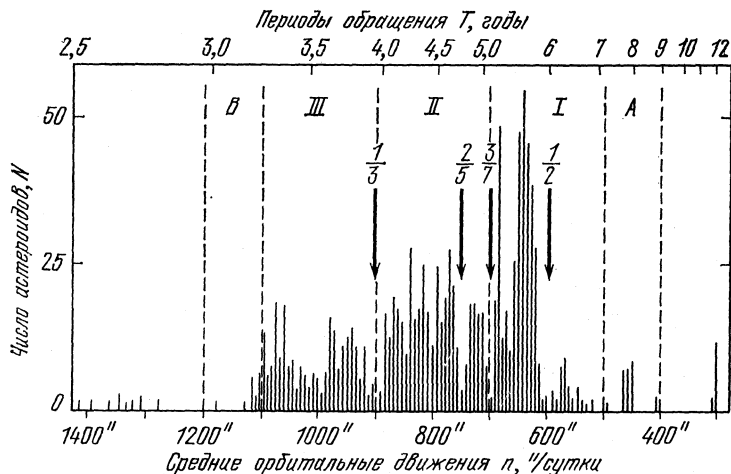


Рис. 22. Распределение астероидов по среднему суточному движению n и периоду обращения T . Показано деление на группы по Г. А. Чеботареву и В. А. Шору (1973). Стрелками показаны некоторые люки Кирквуда.

Попытки объяснить механизм образования люков Кирквуда методами небесной механики остаются пока неудовлетворительными (см., например, Чеботарев, 1973). Но причина их возникновения не вызывает сомнений и заключается в Юпитере. Дело в том, что отсутствуют как раз астероиды, которые двигались бы в соизмеримости (или вблизи соизмеримости) с Юпитером, например, в соизмеримости $n_{Ю} : n = 1 : 2$, $1 : 3$ и $1 : 4$, т. е. астероиды с $n = 600$, 900 и $1150''$.

На примере люка $1 : 3$ было показано (Симоненко и др., 1980), что ширина люка растет с ростом эксцентриситета и наклона орбит. У люка $1 : 3$ она достигает $1'$ в распределении n орбит с $e > 0,3$ и $i > 25^\circ$. Наблю-

даемая же ширина люка (около $10''$) определяется почти круговыми орбитами плоской подсистемы.

Короткопериодические возмущения заставляют колебаться n с амплитудой тем большей, чем ближе к люку находится орбита. Но амплитуда колебаний даже у границ люка оказывается, как правило, значительно меньше его ширины (см. также Чеботарев и др., 1974). Границы люка «дрожат», но «засорение» люка не происходит. Тем не менее два астероида — (887) Алинда и (1915) Кетцалькоатль — проводят все время внутри люка $1 : 3$ (соответствующего их эксцентричным и наклоненным орбитам). Модельные расчеты показали, что иногда астероиды могут проникать в люк и оставаться в нем под влиянием Юпитера при благоприятном их расположении на орбитах.

Резонансные астероиды. Удивительным фактом является то, что Юпитер, уничтожив каким-то образом астероиды, двигавшиеся в соизмеримости с ним (или, быть может, не допустив их возникновения) в плотных частях кольца астероидов, создал сгущения (хотя и не все многочисленные) у внешней окраины кольца. Эти сгущения состоят из астероидов, движущихся в соизмеримости с Юпитером $1 : 1$, $3 : 4$, $2 : 3$ и других и имеющих периоды обращения от 7 до 12 лет. Вблизи соизмеримости $2 : 3$ движутся по сходным орбитам ($3,9 < a < 4,2$; $0,06 < e < 0,24$; $0^\circ,8 < i < 11^\circ,3$) 24 известных астероида упоминавшейся уже группы Гильды со средними движениями $440'' < n < 460''$. Члены этой группы могут близко подходить к орбите Юпитера (на расстояние до нескольких десятых а. е.), но, благодаря соизмеримости их движения с Юпитером, им всегда удается избежать слишком тесных сближений с этим гигантом: Юпитер не оказывается на том участке его орбиты, к которому приближается астероид группы Гильды. Поэтому члены группы Гильды не испытывают сильных возмущений со стороны Юпитера и сохраняют размеры своих орбит почти неизменными.

Вблизи соизмеримости $1 : 1$ с Юпитером движутся две группы Троянцев со средними движениями $n \approx 300''$, располагающиеся в окрестностях лагранжевых точек L_4 и L_5 . Орбиты Троянцев лежат в окрестностях орбиты Юпитера. Как показали исследования Г. А. Чеботарева и др. (1975), среди астероидов с малыми суточными движениями ($n = 340-440''$) встречаются астероиды, движущиеся

щиеся вблизи соизмеримости с Юпитером $n_{Ю} : n = 6 : 7$, $5 : 6$, $4 : 5$ и $5 : 7$.

Подчеркнем, что подобные соизмеримости не являются точными, и речь идет только о том, что астероид движется вблизи соизмеримости, редко — вблизи острой соизмеримости. Такая соизмеримость сама по себе еще не означает, что движение астероида по отношению к Юпитеру является резонансным *). Резонанс с Юпитером — это соизмеримость в движении с ним особого вида. При резонансе с Юпитером энергия астероида в системе Солнце—Юпитер испытывает только колебания (иногда значительные), не ведущие к прогрессивному изменению энергии и размеров орбиты на протяжении всего времени, пока сохраняется резонанс. Причиной таких колебаний энергии астероида является ускорение его движения Юпитером, строго периодически сменяющееся замедлением движения. При этом энергия добавляется астероиду, а затем отбирается у него в одинаковых количествах. Ситуация аналогична той, которая наблюдалась бы у качающегося маятника при отсутствии сил сопротивления.

Своеобразие небесно-механического резонанса заключается в том, что частота вынуждающей силы (определяемая движением Юпитера) остается постоянной (поскольку постоянной остается на рассматриваемом интервале времени его орбита), тогда как собственная частота «резонирующей системы» (определяемая движением астероида) меняется с течением времени под действием вынуждающей силы. При этом энергия, поглощаемая (или теряемая) резонирующей системой в течение одного цикла воздействий вынуждающей силы (одного оборота Юпитера) оказывается тем меньше, чем больше изменилась собственная частота резонирующей системы. Процесс передачи энергии (Юпитером астероиду или им Юпитеру) затухает, а затем сменяется процессом противоположного направления. Поэтому небесно-механический резонанс проявляется в колебании энергии резонирующей системы около значения, соответствующего точной соизмеримости движения с Юпитером. Амплитуда колебаний энергии

*) В настоящее время в небесной механике еще редко различают понятия резонанса и соизмеримости. Однако такое различие представляется целесообразным и помогает понять особенности движения астероидов.

оказывается, как правило, тем больше, чем больше эксцентриситет и наклон орбиты астероида. Механизм сохранения резонанса для многих частных случаев подробно рассматривается С. Пилом (1976).

Признаком резонанса является либрационное движение *) самого астероида или его орбиты.

Анализ эволюции орбит резонансных астероидов позволяет предполагать, что особый характер их движения является временным явлением и постепенно расстраивается под действием планетных возмущений. Длительность пребывания в резонансе при прочих равных условиях зависит от ширины резонансной зоны. Дело в том, что резонансный характер движения может осуществляться не только при точной соизмеримости движения астероида с Юпитером. Отклонение от точной соизмеримости (в обе стороны), при котором еще сохраняется резонансный характер движения, как раз и определяет ширину резонансной зоны. Если простые числа, входящие в резонансное соотношение, обозначить через l и $l_{Ю}$, то ширина резонансной зоны окажется пропорциональной $1/(l + l_{Ю})!$

Очевидно, резонансная зона оказывается наиболее широкой при $l = l_{Ю} = 1$, т.е. для Троянцев. Это может объяснить, почему Троянцы так многочисленны. В самом деле, резонанс (состояние либрации) можно рассматривать как замедление прогрессивной эволюции орбиты астероида, когда энергия астероида, как сказано выше, испытывает лишь колебания около некоторого значения. Поэтому, вообще говоря, астероиды должны скапливаться внутри резонансной зоны, если только она не слишком мала по отношению к возмущениям астероидов со стороны планет или других крупных астероидов.

В прошлом Бессель и Ньюкомб на основании упрощенных расчетов приходили к выводу, что можно было бы ожидать груннировок орбит астероидов именно там, где наблюдаются люки Кирквуда. Однако Э. Броун показал, что у астероидов, движущихся вблизи соизмеримости $1 : 2$, орбиты быстро меняются, если отклонение от точной соизмеримости превышает 1%.

*) От лат. *librare* — раскачивать. Качание около некоторого среднего положения.

Эволюция орбит астероидов, движущихся вблизи соизмеримостей, исследовалась неоднократно. Г. А. Чеботарев и др. (1975) привели сведения об эволюции орбиты астероида 2824-PL, движущегося в настоящее время вблизи соизмеримости 5 : 7, при которой ширина резонансной зоны очень мала. Отклонение от точной соизмеримости у астероида составляет $8''$.

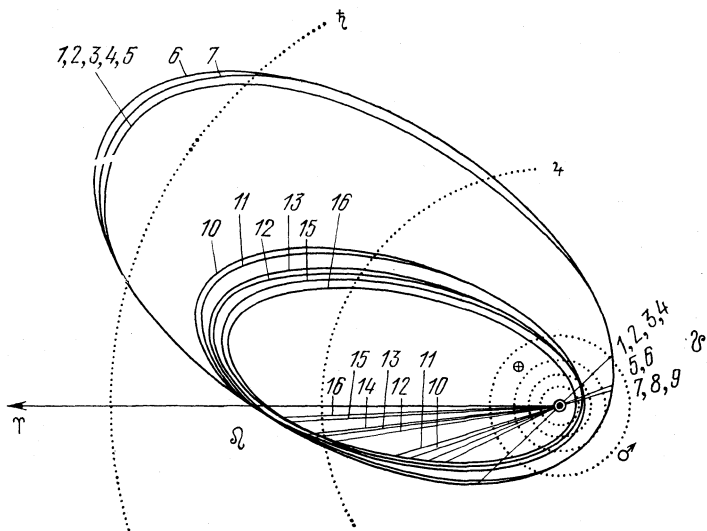


Рис. 23. Эволюция орбиты астероида 2824-PL. Показаны оскулирующие орбиты и положения их узлов через каждые 25 лет с 1660 до 2059 гг. Современная орбита — № 13. (По расчетам Г. А. Чеботарева и др., 1975.)

Согласно результатам исследований афелий орбиты астероида до 1892 г. лежал за пределами орбиты Сатурна ($q' = 11$ а. е.), а перигелий находился вблизи земной орбиты (рис. 23). Один из узлов орбиты лежал у орбиты Марса, другой — на сравнительно большом расстоянии от орбиты Юпитера. Планетные возмущения приблизили узел к орбите Юпитера, и благодаря этому в 1892 г. астероид испытал тесное сближение с Юпитером, сопровождавшееся резким сокращением орбиты: афелий скачком

оказался внутри орбиты Сатурна ($q' = 8,04$ а. е.), а перигелий — внутри орбиты Венеры ($q = 0,54$ а. е.). В дальнейшем орбита продолжала медленно уменьшаться, так что во второй четверти XX в. астероид достиг точной соизмеримости с Юпитером 5 : 7. Однако планетные возмущения быстро вывели астероид из точной соизмеримости, хотя в настоящее время он и продолжает еще двигаться вблизи нее. В первой четверти XXI в. в результате дальнейшего сокращения орбиты астероид достигнет соизмеримости 2 : 3, характерной для группы Гильды, но вскоре утратит ее.

Аналогичным образом под действием планетных возмущений астероиды 9529-PL и 2190-PL в ближайшем будущем утратят соизмеримости 4 : 5 и 5 : 7 соответственно (Чеботарев и др., 1975).

Либрационные движения Троянцев. Наиболее подробно изучены либрационные движения Троянцев (Э. Эверхарт, 1973). Из-за небольшого различия орбит Юпитера и Троянцев эти астероиды совершают колебательные движения (либрируют) около лагранжевых точек L_4 и L_5 , расположенных на орбите Юпитера. Колебания астероидов происходят главным образом вдоль орбиты Юпитера. Когда Юпитер замедляет движение астероида, уменьшаются размеры орбиты последнего и период его обращения вокруг Солнца, так что астероид движется по орбите быстрее Юпитера. Затем Юпитер начинает ускорять движение астероида. В результате размеры его орбиты увеличиваются, период обращения возрастает, так что астероид начинает двигаться медленнее Юпитера. Это приводит к тому, что астероид из окрестностей лагранжевой точки L_5 сначала приближается к Юпитеру, а затем удаляется от него, в то время как астероид из окрестностей лагранжевой точки L_4 сначала удаляется от Юпитера, а затем приближается к нему. Этот процесс повторяется неоднократно.

Амплитуда либрационных движений астероида (амплитуда отклонений от лагранжевых точек) тем больше (а период либрационных движений тем меньше), чем больше отличается его орбита от орбиты Юпитера.

Либрационные движения Троянцев приводят к тому, что взаимное расположение астероидов в обеих группах непрерывно меняется.

Сатурн не оказывает на поведение Троянцев большого влияния. Поэтому время жизни либрирующих астероидов в окрестностях орбиты Юпитера, вероятно, очень велико. Однако если на больших промежутках времени Сатурн изменит орбиту Троянца всего на $\sim 0,01$ а. е., то амплитуда либрационных движений возрастет настолько, что астероид сможет перейти из одной группы в другую вдоль части орбиты, противоположной Юпитеру. Следует, однако, сказать, что все открытые до сих пор Троянцы располагаются в окрестностях точек L_4 и L_5 . Троянцы, совершающие переход из группы в группу, пока не известны. Но не надо забывать, что доля открытых Троянцев составляет всего 1—2% (Ван Хоутен и др., 1970).

Смещения Троянцев в направлении к Юпитеру всегда остаются намного меньше, чем в противоположную сторону. Однако при различии размеров орбит Троянцев и Юпитера на несколько сотых а.е. смещение в сторону Юпитера достигает почти 60° , и Троянец может, близко подходя к Юпитеру, испытывать сильные возмущения с его стороны. После таких возмущений либрация астероида, как показывают расчеты, может прекратиться и движение астероида перестанет быть резонансным. Разность долгот Юпитера и астероида с течением времени будет непрерывно расти, и астероид, потеряв принадлежность к Троянцам, будет во вращающейся с Юпитером системе координат описывать вокруг Солнца один круг за другим. Иными словами, либрационное движение астероида сменится циркуляцией.

Вероятно, возможна и обратная ситуация: при благоприятных условиях астероид, никогда до этого не бывший Троянцем, может быть захвачен Юпитером и превращен в Троянца.

Таким образом, членство астероидов среди Троянцев, возможно, не является постоянным. В связи с этим неоднократно высказывалось предположение, что в число Троянцев могут захватываться объекты из числа тех, которые движутся между Юпитером и Сатурном. Не исключено, что там находится много объектов, остающихся нам неизвестными из-за того, что, будучи далекими, они оказываются слишком слабыми для обнаружения.

Гипотетические «троянцы» Сатурна. Долгое время казалось, что ни одна другая планета, кроме Юпитера, не

может иметь своих «троянцев», потому что сильные возмущения со стороны Юпитера не позволят астероидам сколько-нибудь долго сохранять резонанс $1 : 1$ с той или иной планетой. Однако Э. Эверхарт (1973) показал, что принципиально возможно существование «троянцев» и у Сатурна. На основании модельных расчетов поведения астероидов, расположенных в окрестностях лагранжевых точек L_4 и L_5 в системе Солнце — Сатурн, проведенных с учетом возмущений со стороны Юпитера, Эверхарт получил, что астероиды могут оставаться либрирующими в окрестностях этих точек в течение длительного времени, хотя амплитуда либрационных движений может меняться очень сильно, то увеличиваясь, то уменьшаясь. Юпитер расстраивает либрацию за $\sim 10^5$ лет. Но он может и восстановить либрацию, а также помочь Сатурну захватить в резонанс $1 : 1$ новый астероид.

Как видно, ситуация похожа на описанную для Троянцев Юпитера, но отличается от нее меньшей шкалой времени жизни сатурновых троянцев. Однако ни один сатурновый троянец не известен.

Семейства астероидов. В 1876 г., когда было известно всего около 150 астероидов, Д. Кирквуд попытался разобраться «в хаосе» астероидных орбит. Он выявил около 10 групп, каждая из которых состояла из 2—3 астероидов, двигавшихся по сходным орбитам. Такие астероиды можно было рассматривать как обломки более крупных тел.

Попытки Кирквуда продолжил Ф. Тиссеран, составивший в 1891 г. свой список астероидов со сходными орбитами, а затем М. Маскар, выделивший в 1899 г. уже 20 пар из 417 астероидов.

Но в 1918—1919 гг. японский астроном К. Хираяма указал, что сходство орбит астероидов еще не означает, что эти астероиды в прошлом были частями одного, более крупного тела: при большом числе астероидов не исключено случайное сходство орбит некоторых из них. Однако основная трудность заключалась в том, что в поисках «родственников» сравнивались оскулирующие орбиты астероидов, определенные на эпоху наблюдений. Между тем возмущения со стороны планет, накапливаясь с течением времени, могли неузнаваемо и по-разному изменить орбиты астероидов, действительно являющихся обломками од-

ного и того же тела и двигавшихся в прошлом по сходным орбитам. С другой стороны, сходство оскулирующих орбит не означает, что астероиды и в далеком прошлом тоже двигались по сходным орбитам. На основании сходства современных орбит можно обнаружить лишь такие группы «родственников», которые образовались совсем недавно ($\leq 10^3$ лет назад), так что их орбиты еще не успели измениться под действием планетных возмущений.

Хираяма поставил вопрос: можно ли выявить группы астероидов, связанных да в н п м родством, или *семейства* астероидов (как он их назвал), и как это сделать?

Теория движения спутников, разработанная раньше Лагранжем с учетом планетных возмущений, указывала, что эксцентриситеты и наклоны орбит спутников остаются почти неизменными, в то время как долготы перигептра и узла орбиты непрерывно меняются. Это привело Хираяму к идее *инвариантных элементов* астероидных орбит, которые тоже не менялись бы (или менялись бы медленно) под действием планетных возмущений. Такие инвариантные элементы можно было бы использовать для поисков семейств астероидов. Хираяма назвал такие инвариантные элементы и назвал их *собственными* элементами орбиты, т. е. унаследованными от их родительских тел *).

Собственные элементы представляют собой, вообще говоря, кеплеровы элементы орбит астероидов, исправленные за вековые возмущения **).

Они определяются из соотношений, в которые входят элементы оскулирующей орбиты и возмущающие функции:

$$e' \sin \pi' = e \sin \pi - \Delta h,$$

$$e' \cos \pi' = e \cos \pi - \Delta k,$$

$$\sin i' \sin \Omega' = \sin i \sin \Omega - \Delta p,$$

$$\sin i' \cos \Omega' = \sin i \cos \Omega - \Delta q,$$

где e' — собственный эксцентриситет, i' — собственный

*) Конечно, при дроблении астероидов их обломки, получив разные, но малые добавки к орбитальной скорости, движутся по разным орбитам со слегка различными собственными элементами. Но эти различия не настолько велики, чтобы помешать «узнать» члены семейства.

**) Периодические (точнее, короткопериодические) возмущения не рассматриваются, так как их влияние на орбиту малое.

наклон, π' — собственная долгота перигелия, Ω' — собственная долгота восходящего узла, или элементы собственной орбиты, а e , i , π и Ω — аналогичные элементы орбиты, приобретенной к настоящему времени под влиянием планетных возмущений. Входящие в формулы Δh , Δk , Δp и Δq — малые величины, зависящие от величины большой полуоси орбиты астероида (которая остается неизменной в ходе вековых возмущений) и от элементов орбит возмущающих планет.

Собственные наклоны и эксцентриситеты почти не подвержены вековым изменениям, и можно считать, что они оставались неизменными на протяжении миллионов лет. Что касается собственных долготы перигелия и долготы узла, то они меняются значительно быстрее. Собственная долгота перигелия, хотя и медленно (со скоростью от десятков секунд дуги до десятков минут дуги в год), но непрерывно и притом почти равномерно растет, а собственная долгота узла убывает со скоростью того же порядка. Для тел в кольце астероидов периоды обращения перигелия и восходящего узла орбит вокруг Солнца порядка нескольких тысяч лет. Они возрастают с уменьшением размеров орбиты.

Итак, астероиды быстрее «забывают» свой узел и перигелий и гораздо дольше «помнят» наклон орбиты и ее эксцентриситет.

Для поисков семейств Хираяма воспользовался собственным наклоном и эксцентриситетом орбит. Сначала, чтобы упростить расчеты, он учитывал только возмущения от Юпитера, пренебрегая более слабым влиянием Сатурна и остальных планет. Ему удалось выявить три семейства (семейства Фемиды, Эос и Корониды, названные по члену семейства, открытому первым), а затем еще четыре семейства и менее уверенно — шесть. Но скоро Хираяме стало ясно, что необходимо учитывать воздействие и других планет, особенно Сатурна, который оказывает, как выяснилось, существенное влияние на орбиты астероидов с большими a . Сделав это, Хираяма пришел к выводу о существовании пяти семейств — Фемиды, Эос, Корониды, Марии и Флоры. К этим семействам Хираяма (1923) отнес десятки известных астероидов. Впоследствии семейства были пополнены вновь открытыми астероидами (рис. 24).

Самым многочисленным оказалось семейство Флоры. Д. Брауер на основании уточненной им теории возмущений разделил его на четыре отдельных семейства — I, II, III и IV.

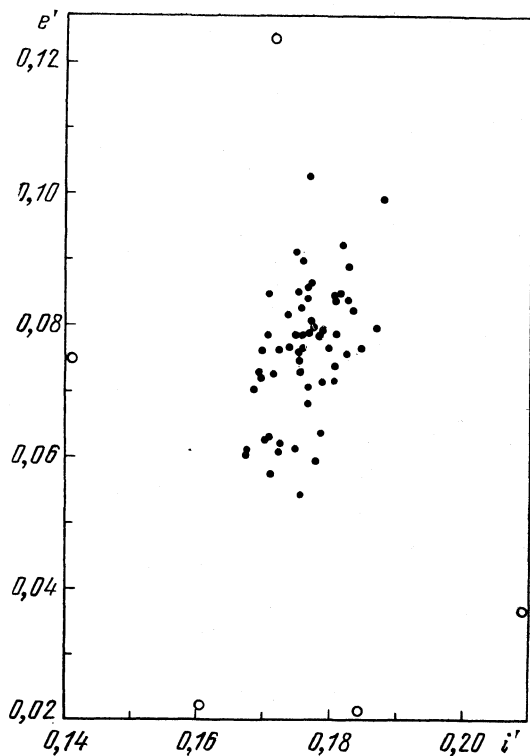


Рис. 24. Семейство Эос, возникшее $\sim 1,5 \cdot 10^6$ лет назад в результате дробления крупного астероида. Члены семейства (показаны точками) образуют компактную грунну в плоскости собственных элементов e' — i' среди прочих астероидов (из которых несколько попали в пределы области, показанной на рисунке, и обозначены кружками).

Дальнейшие исследования, проведенные американским исследователем Дж. Арнольдом (1969), показали, что «семейственность» широко распространена среди астероидов: из 1697 нумерованных астероидов 712 (или 42%) от-

носятся к 37 семействам и еще «помнят» орбиту родительского тела. Аналогичной оказалась ситуация у астероидов Паломар-Лейденского обозрения: из 980 новых астероидов 389 (40%) оказались входящими в то или иное семейство — уже известное или новое.

Число семейств, выявленных к настоящему времени, превышает 50. Многие из них насчитывают десятки и сотни известных членов с массами в огромном диапазоне. Предполагается, что истинное число членов семейств — на один-два порядка больше (рис. 25).

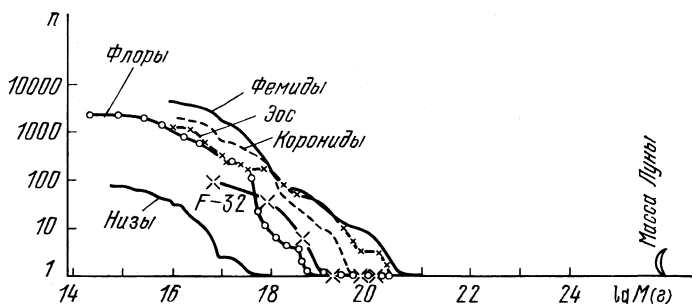


Рис. 25. Распределение по массе M членов семейств Флоры, Фемиды, Эос, Корониды и др. Указано «истинное» число астероидов, исправленное за неполноту их открытий. Справа по оси абсцисс для сравнения указана масса Луны. (По данным Б. Ю. Левина, 1973.)

В конце 60-х гг. шведский астрофизик Х. Альвен (1969) попытался выявить в кольце астероидов (точнее, в семействах) тела, движущиеся по сходным орбитам, потребовав у их орбит сходства не двух, а четырех собственных элементов (не считая a), в том числе π' и Ω' . В семействе Флоры I он нашел 13 (из 23) астероидов, орбиты которых имели π' в очень узком секторе от 26 до 33° . Правда, концентрация Ω у них была менее резкой. Рассмотрев семейства Флоры II, III и IV, он и там нашел группу в 20 астероидов (из 99) с $23^\circ < \pi' < 26^\circ$ и 28 астероидов с $0 < \pi' < 6^\circ$. Были найдены и другие подобные группы, названные Альвеном струйными потоками.

Из сказанного выше ясно, что как бы тесно ни были расположены узлы и перигелии орбит у обломков, образовавшихся при дроблении более крупного астероида,

за 10^5 — 10^6 лет они из-за небольшого различия в размерах орбит обломков распределяются более или менее равномерно по всем долготам. Поэтому струйные потоки можно рассматривать как молодые образования, свидетельствующие о недавних дроблениях *).

Как показал Б. Ю. Левин (1973), значительная часть семейств и струйных потоков содержит один довольно крупный астероид, резко выделяющийся среди остальных более мелких членов семейства. Из 54 семейств, рассмотренных Левиным, у 14 (т.е. у 26%) самый крупный астероид семейства превосходит остальные члены по массе на порядок и более. В четырех случаях (7%) различия по массе оказываются колоссальными и составляют три порядка и более. Это означает, что «глава» семейства имеет поперечник, более чем в 10 раз превосходящий поперечники остальных астероидов. Главами подобных семейств являются, например, Церера, Паллада и Веста (рис. 26).

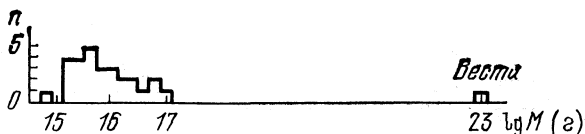


Рис. 26. Семейство Весты. По массе известные члены семейства в 10^6 — 10^8 раз меньше породившей их Весты. (По Б. Ю. Левину, 1973.)

Возникновение таких семейств и струйных потоков может быть связано со столкновениями астероидов, сильно различающихся по массе (когда более крупный астероид почти полностью сохраняется), а также с «косыми» (почти касательными) столкновениями астероидов со сравнимыми массами. В последнем случае возможно образование семейства с двумя крупными членами. Таким является, например, семейство $A = 82$ **), в составе которого находятся два крупных астероида (19) Фортуна и (21) Лютеция.

*) Правда, сам Альвен придерживается мнения, что струйные потоки представляют собой структурные образования тел, находящихся на пути к аккумуляции.

***) Обозначения по Арнольду (1969),

Однако большинство семейств образовалось, по-видимому, при катастрофических разрушениях астероидов, давших начало этим семействам: они не содержат астероидов, которые бы сильно превосходили по массе и размерам остальные члены семейства.

Обломки, образовавшиеся при дроблении астероида, из-за слегка разных у них гелиоцентрических скоростей обгоняют друг друга, оставаясь в окрестностях орбиты родительского астероида. В течение нескольких лет они «растягиваются» вдоль всей орбиты, образуя рой. Забавно, что уцелевшие «родители» семейств «не терпят своих детей». Они могут вычерпывать их из роя, причем из-за малой относительной скорости (десятки метров в секунду) встреча астероида со своими обломками не приводит к дальнейшему дроблению: обломок просто зарывается в реголит своих родителей. Впрочем, такая участь постигает немногих. Большая же часть обломков, испытывая гравитационные возмущения со стороны своего родительского астероида при встречах с ним, меняет орбиты. Это приводит к рассеянию роя и снижению пространственной плотности тел в нем. Аналогичное действие оказывают на рой и планетные возмущения.

§ 6. Группы Аполлона и Амура

Состав групп Аполлона и Амура. В настоящее время известно несколько десятков астероидов, глубоко проникающих внутрь орбиты Марса и являющихся членами групп Аполлона ($q \leq 1$ а. е.) и Амура ($1 < q < 1,3$ а. е.) *). Орбиты 48 таких астероидов, открытых до 1 января 1978 г., показаны на рис. 27. Некоторые сведения об этих астероидах приведены в табл. 1. Указан номер астероида, его название и/или предварительное обозначение, размеры астероида, вычисленные в предположении среднего альбедо или на основании специальных физиче-

*) Разделение астероидов на группы Аполлона и Амура было сделано в прошлом формально, в зависимости от величины перигелийного расстояния оскулирующих орбит астероидов, и не предполагало генетической связи (т. е. общности происхождения из одного крупного астероида) между астероидами, оказавшимися в каждой из этих групп, в отличие от того, как это предполагается для членов семейств.

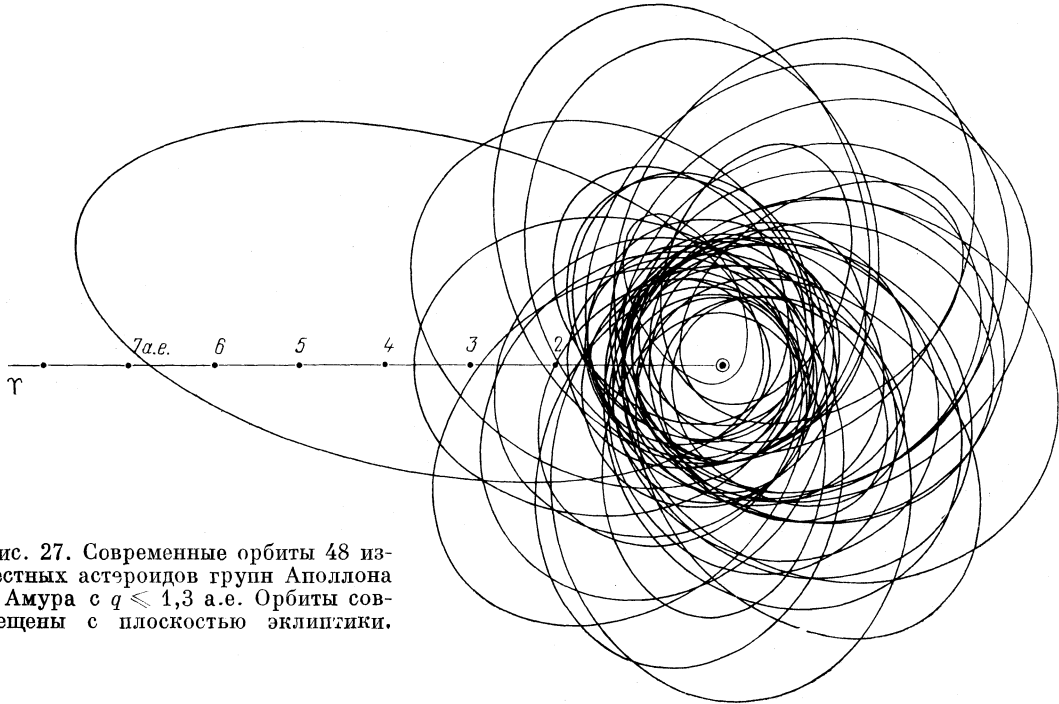


Рис. 27. Современные орбиты 48 известных астероидов групп Аполлона и Амура с $q \leq 1,3$ а.е. Орбиты совмещены с плоскостью эклиптики.

Астероиды на орбитах с $q < 1,3$ а. е. (по состоянию на 23 сентября 1977 г.)

№№ п/п	Номер, название и/или предварительное обозначение	Тип	D, км	Элементы орбиты								Группа
				a, а. е.	e	q, а. е.	q', а. е.	i	ω	Ω	π	
								1950,0				
1	1566 Икар	O	1	1,078	0,827	0,186	1,97	23,°0	30,°9	87,°8	118,°7	—
2	1974 MA 5660		4,18	1,757	0,760	0,422	3,09	37,7	126,8	302,1	68,9	V
3	1936 CA Адонис 2101		0,76	1,873	0,764	0,441	3,30	1,4	41,0	351,2	32,2	I
4	1976 UA 2340			0,844	0,450	0,464	1,22	5,9	39,6	241,2	250,8	IV
5	2824-PL			4,108	0,881	0,49	7,7	11,1	159,8	7,9	167,7	I
6	1864 Дедал (1971 FA)		2,20	1,461	0,615	0,567	2,36	22,1	325,2	6,3	331,5	I
7	1865 Цербер		1,26	1,080	0,467	0,576	1,58	16,1	325,0	242,5	177,5	I
8	1937 UB Гермес		0,96	1,639	0,624	0,614	2,06	6,2	90,7	35,3	126,0	I
9	1973 EA 1981		1,3	1,776	0,050	0,622	2,93	39,9	207,6	356,7	264,3	V
10	1862 Аполлон (1932 HA)	1,58	1,470	0,560	0,647	2,29	6,4	285,3	35,6	320,8	I	
11	1977 NB 2063		1,077	0,349	0,701	1,45	9,4	54,9	32,8	87,7	IV	
12	1685 Торо	L5	3	1,368	0,436	0,771	1,96	9,3	126,6	274,0	40,5	II
13	1976 AA 2062	S	1	0,966	0,183	0,790	1,14	18,9	147,8	108,1	255,9	IV
14	1977 HA 2135		1,600	0,504	0,794	2,41	23,1	290,4	190,9	121,3	II	
15	6743-PL 5011		0,48	1,620	0,493	0,821	2,42	7,3	104,7	10,9	115,6	II
16	1620 Географ	S	3	1,244	0,335	0,825	1,65	13,3	276,3	336,9	253,2	II
17	1976 WA 2329		2,407	0,653	0,828	4,00	24,3	145,5	169,2	314,7	II	
18	1947 XC 2201	2,50	2,25	0,63	0,83	3,7	1	61	83	144	II	
19	1959 LM 4183	6,32	1,34	0,38	0,83	1,9	3	233	304	177	II	
20	1950 DA		1,66	1,863	0,502	0,838	2,53	12,1	223,6	356,8	220,4	II
21	1866 Сизиф (1972 XA)	5,02	1,894	0,540	0,871	2,92	41,1	292,9	63,2	356,1	V	
22	1973 NA 5496	3,32	2,429	0,638	0,879	3,98	68,0	118,4	100,4	218,8	V	
23	1863 Антиной (1948 EA)	2,00	2,260	0,606	0,891	3,63	18,4	265,8	347,9	253,7	III	
24	1975 YA 2102	1,26	1,290	0,298	0,905	1,67	64,0	61,7	93,7	155,4	V	

Таблица 1 (продолжение)

№ п/п	Номер, название и/или предварительное обозначение	Тип	D, км	Элементы орбиты								Группа
				a, а. е.	e	q, а. е.	q', а. е.	1950,0				
								i	ω	Ω	π	
25	6344-PL		0,40	2,576	0,635	0,940	4,21	4,6	232,6	184,3	56,9	—
26	1960 UA 2067		0,96	2,265	0,537	1,049	3,48	3,7	155,8	207,5	3,3	III
27	1915 Кетпалькоатль (1953 EA)		0,72	2,520	0,683	1,052	3,99	20,5	347,6	162,6	150,2	III
28	1917 Куйо (1968 AA)		2,00	2,149	0,505	1,063	3,23	24,0	193,9	188,0	21,9	III
29	1943 (1973 EC)		2,00	1,431	0,256	1,065	1,80	8,7	337,9	246,0	223,9	III
30	1946 SD			1,313	0,179	1,078	1,55	1,5	7,9	50,1	58,0	III
31	1950 LA 1980		2,50	1,709	0,365	1,085	2,23	26,8	115,6	246,2	1,8	III
32	1221 Амур		0,58	1,921	0,436	1,085	2,76	11,9	25,9	171,1	197,0	III
33	1972 RB		0,40	2,168	0,492	1,088	3,23	5,2	152,0	177,0	329,0	III
34	1953 NC		66,2	2,724	0,596	1,100	4,35	12,0	226,9	239,8	106,7	III
35	1949 SZ			1,326	0,163	1,110	1,54	1,1	13,3	67,4	80,7	III
36	1580 Бетулия		2,94	2,196	0,491	1,119	3,27	52,0	159,1	61,8	220,9	V
37	1627 Ивар		5,68	1,864	0,396	1,126	2,60	8,4	167,0	132,9	299,8	III
38	1972 RA 2202		1,26	2,362	0,523	1,127	3,47	9,0	216,8	169,9	26,7	III
39	433 Эрос	LL6	23×12	1,458	0,223	1,133	1,78	10,8	178,1	304,0	122,1	III
40	887 Алида	H3	4	2,516	0,543	1,148	3,88	9,1	348,4	110,8	99,2	III
41	4788-PL		1,06	2,546	0,545	1,158	3,93	10,8	95,8	178,4	274,2	III
42	1936 UI			1,571	0,258	1,166	1,98	1,1	146,6	195,5	341,1	III
43	719 Альберт		1,68	2,584	0,540	1,188	3,98	10,8	151,9	186,1	338,0	III
44	1036 Ганимед		26,86	2,658	0,542	1,216	4,10	26,3	131,1	216,3	347,4	III
45	1977 RA 2368			2,105	0,412	1,238	2,97	5,3	41,7	287,3	329,0	III
46	1963 UA 2058		1,1	2,645	0,530	1,243	4,05	11,1	189,7	201,0	30,7	—
47	1916 (1953 RA)		3,02	2,273	0,450	1,251	3,295	12,8	334,7	340,5	315,2	—
48	1951 Лира (1949 OA)		4,00	1,391	0,062	1,305	1,48	39,1	140,2	130,2	270,4	V

ских наблюдений (§ 7). В последнем случае указан тип поверхности астероидов. Далее приведены элементы оскулирующих орбит на момент наблюдений, причем угловые элементы орбит отнесены к равноденствию и эклиптике 1950,0.

Люки в распределении перигелиев оскулирующих орбит. Если у орбит астероидов группы Аполлона и Амура совместить линии апсид, как это сделано на рис. 28, то

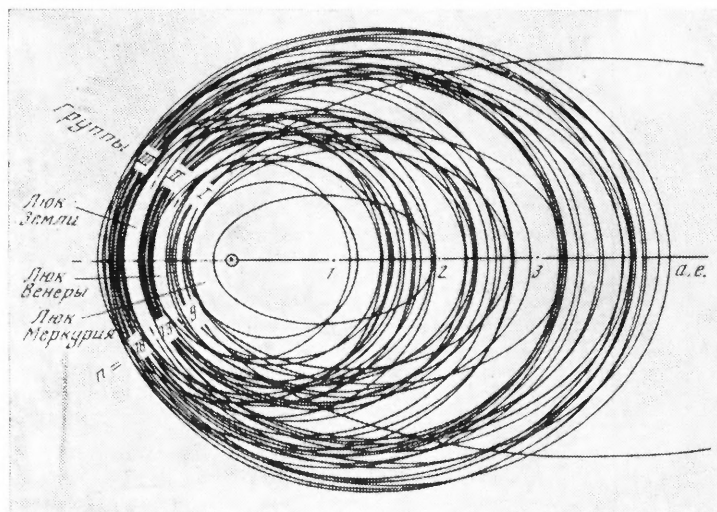


Рис. 28. Те же орбиты, что и на рис. 27, с совмещенными линиями апсид.

бросится в глаза тенденция к группированию перигелиев. В районе перигелиев орбиты собираются в три компактных пучка (Симоненко, 1977в):

у 9 астероидов	$0,422 \leq q \leq 0,647$ а. е.
у 13 астероидов	$0,771 \leq q \leq 0,905$ а. е.
у 18 астероидов	$1,049 \leq q \leq 1,2$ а. е. *)

*) В настоящее время из-за недостатка сведений об астероидах на орбитах с $q > 1,2$ а. е. неясно, как далеко простирается эта группа в сторону больших q . Значение $q = 1,2$ а. е. в качестве одной из ее границ принято условно.

Между пучками находятся широкие просветы — люки, которые располагаются как раз на тех гелиоцентрических расстояниях, где движутся планеты:

люк Меркурия	$q < 0,422$ а. е.,
люк Венеры	$\Delta q = 0,124$ а. е.,
люк Земли	$\Delta q = 0,142$ а. е.

Заметим, что люки не симметричны по отношению к планетным орбитам, а смещены к Солнцу.

В люки попало всего три астероида: в люк Меркурия — (1566) Икар, в люк Венеры — астероид 1977 НВ, в люк Земли — астероид 6344-РЛ. Пребывание в люке последнего астероида недостоверно из-за неуверенных элементов его орбиты.

Естественное объяснение причин возникновения люков заключается в том, что планеты сами расчистили пространство на своем пути, вычерпывая и возмущая приближающиеся к ним астероиды. В самом деле, при заданном расстоянии между орбитами астероида и планеты в районе их сближения вероятность вычерпывания, по геометрическим соображениям, пропорциональна $1/\sin \epsilon''_{AA}$ (ϵ''_{AA} — угол между орбитами, или элонгация истинного, т. е. гелиоцентрического радианта астероида от антиапекса AA), и быстро растет, когда $\epsilon''_{AA} \rightarrow 0$. Это действие так называемого кинематического фактора *).

В ту же сторону действует и динамический фактор, увеличивая эффективное сечение планеты для захвата астероида во все большей степени по мере убывания ϵ''_{AA} из-за убывания геоцентрической скорости астероида.

Итак, планеты вычерпывают наиболее эффективно те астероиды, перигелии орбит которых лежат вблизи планетных орбит. По тем же причинам астероиды на таких орбитах, не встретившись с планетой, испытывают наибольшие возмущения, так что перигелии их орбит смещаются и уходят из окрестностей планетной орбиты.

Люки в распределении перигелиев представляют собой реальные просветы в распределении астероидов, т. е. зоны пониженной плотности астероидов, в отличие от описанных выше люков Кирквуда.

*) Ситуация оказывается таковой только для орбит, очень близких к орбите Земли.

Следует заметить, что в настоящее время оскулирующие орбиты всех известных астероидов групп Аполлона и Амура являются лишь скрещивающимися или только приближающимися извне к орбитам планет земной группы. Они проходят от планетных орбит в основном на рас-

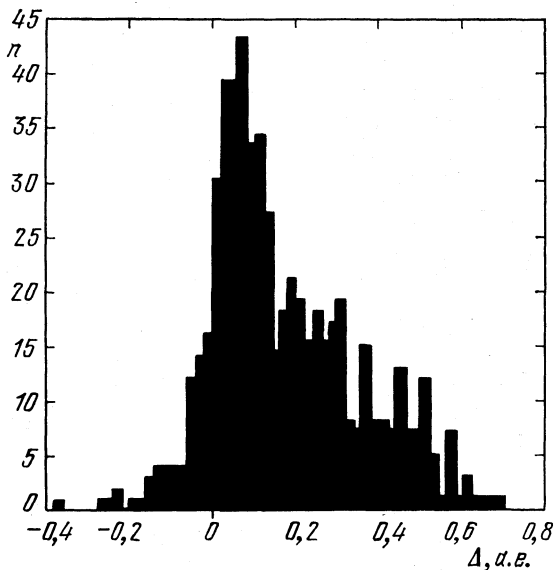


Рис. 29. Минимальное расстояние Δ , на которое астероиды могут приближаться к орбите Марса в ходе вековой эволюции. $\Delta > 0$ при сближениях со стороны больших гелиоцентрических расстояний, $\Delta < 0$ — при сближениях со стороны меньших. (По расчетам Дж. Вильямса, 1971.)

стоянии порядка полуширины соответствующего люка. Другими словами, Меркурий, Венера и Земля движутся внутри почти пустых тороидальных зон, — в пространстве, сильно очищенном от астероидов самими планетами. Очевидно, планеты имели достаточно времени, чтобы расчистить свои люки.

Вероятно, такой же люк существует и на орбите Марса. Этому предположению не противоречат результаты анализа возможных тесных сближений астероидов с орбитой Марса, полученные Дж. Вильямсом (1971). Вильямс рассчитал наиболее тесные сближения между Марсом и ас-

тероидами на орбитах с $a < 2,61$ а. е. и получил, что пространственная плотность астероидов резко падает в области, где астероид может столкнуться с Марсом. Этот эффект иллюстрирует рис. 29, где приведена гистограмма числа астероидов в зависимости от расстояния наиболее

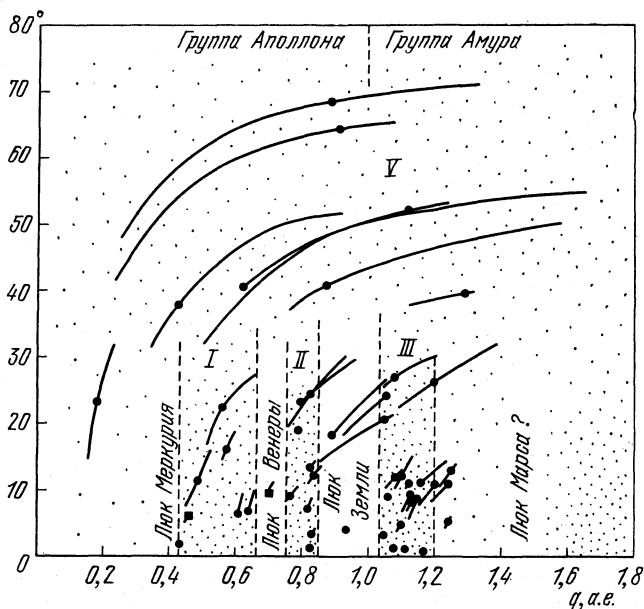


Рис. 30. Свободные осцилляции в поле $q - i$ для 48 известных астероидов групп Аполлона и Амура. Квадратиками показаны современные значения $q - i$ для астероидов группы IV, кружками — для всех остальных.

тесного сближения с интервалом в 0,02 а. е. Отрицательные расстояния означают, что астероид может войти внутрь орбиты Марса на соответствующее расстояние и подвергнуться тесному сближению, в результате которого столкнется с планетой или будет выброшен из Солнечной (планетной) системы.

Ветовые возмущения орбит астероидов группы Аполлона и Амура. Сохранение люков. Членство в группах. Люки, обнаруженные в распределении неригелиев оскулирующих орбит астероидов групп Аполлона и Амура,

не исчезают в ходе свободных осцилляций этих орбит (Симоненко, 1977в, 1978). На рис. 30 показаны свободные осцилляции по q и i у орбит 48 известных астероидов групп Аполлона и Амура с $q < 1,3$ а.е. Они были найдены с помощью номограммы, приведенной на рис. 21. Из рис. 30 видно, что неригелии большинства орбит — с малыми и умеренными наклонами, не превышающими $10-15^\circ$, —

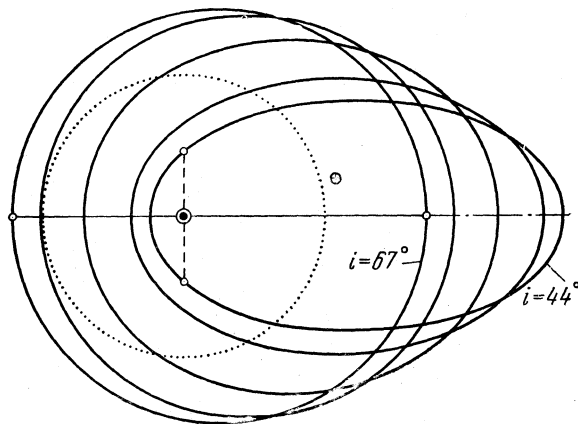


Рис. 31. Изменение формы и наклона орбиты астероида 1975 YA в ходе свободных осцилляций. Линии апсид совмещены. Кружками показаны положения узлов для экстремальной формы орбиты.

осциллируют по q в сравнительно узких пределах, оставаясь между планетными орбитами, или, что то же, в пределах одних и тех же пучков орбит. Астероиды на таких орбитах являются постоянными членами одних и тех же групп-пучков, как и членами групп Аполлона и Амура.

У орбит с большими наклонами амплитуда осцилляций по q очень велика (рис. 31). Астероиды на подобных орбитах оказываются лишь временными членами какой-либо из групп, оставаясь в каждой из них по несколько тысяч лет. Отклонение перигелиев их орбит от эклиптики при убывании q предохраняет околоперигелийные участки астероидных орбит от приближения к орбитам планет, а сами астероиды — от вычернывания. Благодаря этому становится возможным само существование группы асте-

роидов на орбитах с высоким наклоном. Та же причина объясняет упомянутую выше несимметричность люков между группами орбит по отношению к планетным орбитам.

Учитывая свободные осцилляции, целесообразно астероиды, приближающиеся к орбите Земли и скрещивающиеся с ней, т. е. астероиды групп Аполлона и Амура, разделить на пять групп с тремя люками, а именно:

люк Меркурия	$q < 0,42$ а. е.
группа I, $n = 6$ *)	$0,42 < q < 0,67$ а. е.
люк Венеры	$\Delta q = 0,09$ а. е.
группа II, $n = 8$	$0,76 < q < 0,81$ а. е.
люк Земли	$\Delta q = 0,23$ а. е.
группа III, $n = 20$	$1,04 < q < 1,2$ а. е.
группа IV, $n = 3$	малые орбиты
группа V, $n = 7$	большой наклон.

При этом в люке Меркурия по-прежнему находится (1566) Икар, в люке Венеры — астероид 1977 НВ, отнесенный теперь к группе IV, в люке Земли — астероид 6344-PL с мало точной орбитой.

Кроме того, в люк Земли при свободных осцилляциях глубоко проникают еще три астероида с умеренным наклоном орбит. Это (1863) Антиноя, (1917) Куйо и (1915) Кетцалькоатль, которые отнесены к группе III.

Анализ свободных осцилляций, проведенный Дж. Везериллом (1968) для Антиноя, показал, что эти осцилляции не приводят к сильному сближению этого астероида с орбитой Земли, по крайней мере в течение одного периода таких осцилляций. В связи со сходством орбит (и свободных осцилляций) у этого астероида с астероидами Куйо и Кетцалькоатль, последние, вероятно, тоже не испытывают тесных сближений с орбитой Земли.

Вековые возмущения орбит астероидов групп Аполлона и Амура на интервалах времени, существенно превышающих период свободных осцилляций, проводились лишь для нескольких астероидов (Галнбина и др., 1984). На рис. 32 показан пример изменения q и i в ходе свободных и вынужденных осцилляций на интервалах времени, в несколько раз превышающих период свободных осцилляций

*) Число астероидов указано в соответствии с ограничением, что их орбиты в процессе свободных осцилляций достигают $q = 1, 2$ а. е. На том же основании выбрана одна из границ группы III.

для пяти астероидов, отнесенных к группам I и II. Из рисунка видно, что астероиды обнаруживают тенденцию оставаться членами своих групп и не проникать в люки планет. Это позволяет предполагать, что люки планет остаются «незасоренными» по крайней мере на протяжении $\sim 10^5$ лет.

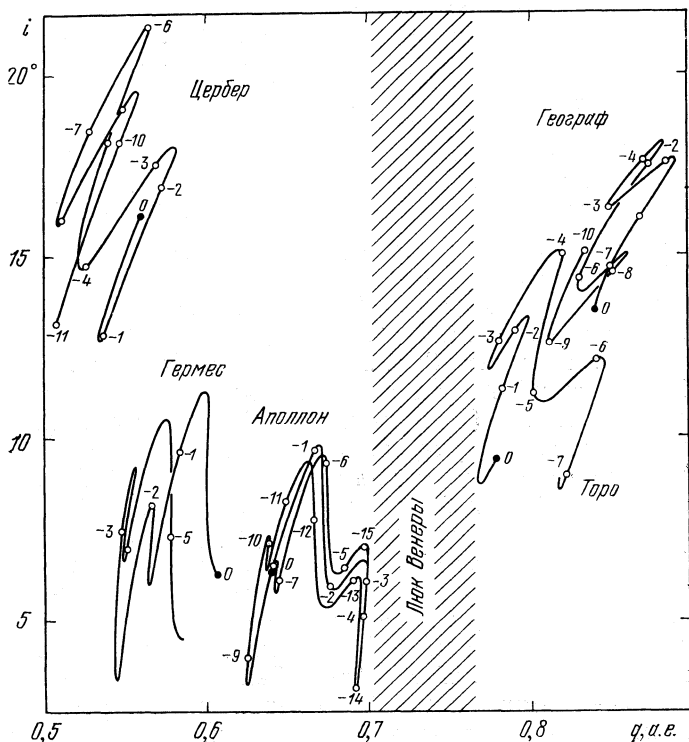


Рис. 32. Свободные и вынужденные осцилляции в поле $q-i$ для 5 астероидов. На кривых — время в прошлом через десятки тысяч лет. (По И. В. Галибиной и др., 1981.)

В течение десятков тысяч лет астероиды группы Аполлона и Амура движутся по орбитам, которые лишь скрещиваются с орбитами планет или только приближаются к ним с внешней стороны, так что встреча астероида с ка-

кой-либо из планет оказывается невозможной. Только на короткое время орбиты астероидов из-за вращения линии узлов могут становиться пересекающими планетные орбиты. Тогда, пока расстояние между планетной орбитой и орбитой астероида не превышает эффективное сечение планеты для захвата, и может произойти столкновение астероида с планетой, если они одновременно окажутся в месте сближения орбит.

Вероятность встречи астероида с планетой определяется произведением доли времени, в течение которого длится благоприятное для встречи расположение орбит, на вероятность нахождения астероида и планеты одновременно в месте сближения орбит. Эта величина оценена Э. Эпиком (1963) в $\sim 10^{-7}$ в год. Она определяет динамическое время жизни астероидов на подобных орбитах по отношению к захвату планетой в $\sim 10^7$ лет.

Астероиды на малых орбитах (группа IV). До середины 70-х гг. не было известно крупных тел на орбитах малых размеров с $a \lesssim 1$ а.е. и с афелиями внутри орбиты Марса. Существование на подобных орбитах мелких частиц — от сантиметровых до микронных размеров — не вызывало сомнений уже давно. Во-первых, такие частицы регистрировались при наблюдениях порожденных ими метеоров инструментальными методами, позволяющими определять точные орбиты этих частиц в Солнечной системе (например, фотографическими и радиолокационными методами). Во-вторых, было ясно, что мелкие частицы могли приобрести малые орбиты под действием эффекта Пойнтинга — Робертсона.

Существование более крупных тел на подобных орбитах, а именно метеоритов, предполагалось Б. Ю. Левиным (1946, 1956), правда, на основании мало надежных данных, полученных из наблюдений болидов, порожденных падающими метеоритами. Доля метеоритов, двигавшихся перед встречей с Землей по малым орбитам, оценивалась Левиным в $\sim 20\%$. Позднее А. Н. Симоненко (1975, 1977а,б) на основании более надежных данных показала, что ряд метеоритов, несомненно, двигался по орбитам малых размеров и что доля таких метеоритов не менее 10% (§ 10). Однако механизм приобретения малых орбит телами дециметровых и метровых размеров (какие дают выпадение метеоритов) оставался проблематичным.

Тела размерами в километры и сотни метров, т. е. астероиды, на малых орбитах были обнаружены американскими астрономами в 1976—1977 гг. в процессе специального многолетнего поиска астероидов, сближающихся с орбитами планет земной группы. Это астероиды 1976 АА, 1976 UА и 1977 НВ, орбиты которых показаны на рис. 33.

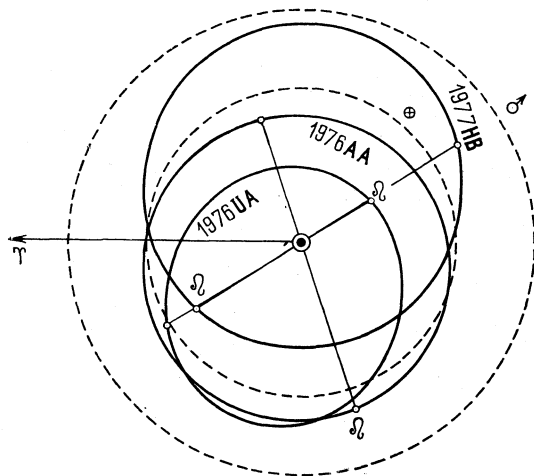


Рис. 33. Малые орбиты астероидов 1976 АА, 1976 UА и 1977 НВ.

Афелии всех трех астероидов лежат внутри орбиты Марса, причем только у астероида 1977 НВ большая полуось орбиты немного превышает 1 а.е. Общее число таких астероидов размерами > 100 м оценивается в несколько десятков (Шумейкер и Хелин, 1976).

Особенно интересна орбита астероида 1976 АА. Большая полуось этой орбиты всего на 0,034 а.е. меньше земной, и период обращения астероида вокруг Солнца составляет 0,950 года (всего на 18 дней короче периода обращения Земли). Особенностью орбиты является ее необычайно малый для астероидов, сближающихся с орбитой Земли, эксцентриситет, составляющий 0,183. Это приводит к тому, что орбита астероида 1976 АА скрещи-

вается только с орбитой Земли. От орбиты Марса она удалена на $\sim 0,4$ а.е., от орбиты Венеры на $\sim 0,08$ а.е.

Астероид 1976 AA движется вблизи соизмеримости 19 : 20 с Землей, и потому через каждые 19 лет почти точно повторяются конфигурации астероида и Земли.

Около половины периода соизмеримости астероид остается позади Солнца на элонгациях, не превышающих 50° , недоступный наблюдениям. Такой была ситуация, например, с 1961 по 1970 гг. Затем элонгация быстро растет, и астероид проводит несколько лет недалеко от Земли, испытывая время от времени довольно тесные сближения с ней. В сентябре 1973 г. астероид прошел на расстоянии 0,32 а.е. от Земли, в июле 1974 г. — на расстоянии 0,20 а.е., в июне 1975 г. — на расстоянии 0,25 а.е., а в январе 1976 г. — на расстоянии всего 0,12 а.е. от Земли.

Именно в январе 1976 г. в необычайно благоприятных для наблюдений условиях и был открыт этот астероид как объект 13^m. В течение следующих трех месяцев астероид двигался медленным попятным движением, так что его геоцентрическое расстояние увеличивалось незначительно, и астероид оставался доступным наблюдениям. Затем движение сменилось поступательным, и это продлило период наблюдений. Спустя год, в январе 1977 г. геоцентрическое расстояние астероида было 0,23 а.е., в январе 1978 г. — 0,50 а.е., в январе 1979 г. достигло 0,78 а.е.

Наблюдения астероида 1976 AA продолжались почти весь 1976 год — случай исключительный в практике изучения астероидов, приближающихся к земной орбите. Это позволило Б. Марсдену и Дж. Вильямсу (1977) определить орбиту астероида с необычайно высокой точностью:

Эпоха	1977 май 17,0 ЕТ	
T_0	1977 май 2,2387 ЕТ	
a	0,966361 а.е.	
e	0,182553	
q	0,789949 а.е.	
i	$18,^\circ 9349$	} 1950,0
Ω	$108,^\circ 0722$	
ω	$147,^\circ 8058$	
n	$1,^\circ 037516$	
T	0,950 года	

Тесные сближения астероида 1976 AA с Землей возможны благодаря тому, что их орбиты сближаются до 0,11

и 0,20 а.е. в районе восходящего и нисходящего узлов орбиты астероида. С орбитой Венеры орбита астероида сближается в одной точке — до 0,08 а.е. Сближения с Венерой астероид испытывает гораздо реже, чем с Землей, из-за существенного различия их периодов обращения. В июле 1956 г. астероид прошел на расстоянии 0,12 а.е. от Венеры, в сентябре 1989 г. — пройдет на расстоянии 0,15 а.е. от нее.

Б. Марсден и Дж. Вильямс (1977) предприняли исследование, целью которого было выяснить, является ли астероид 1976 AA либрирующим по отношению к Земле. Для этого они определили значение так называемого критического аргумента $\sigma = n_E \lambda - n \lambda_E + \pi$, где λ и λ_E — средняя долгота астероида и Земли, n , n_E — простые числа, входящие в соотношение соизмеримости, а π — долгота перигелия орбиты астероида. Современное значение $\sigma = 5^\circ$. В данном случае на либрацию указывало бы колебание σ около некоторого среднего значения с амплитудой, не превосходящей 180° .

Сначала, когда были получены предварительные значения элементов орбиты на основании небольшого ряда наблюдений, казалось, что астероид в прошлом, на протяжении ~ 400 лет, либрировал относительно Земли. Но потом орбита была определена более точно, и оказалось, что на протяжении по крайней мере нескольких столетий ни в прошлом, ни в будущем либрация не обнаруживается.

Астероид 1976 AA движется вблизи острой соизмеримости 11 : 17 еще и с Венерой. В той же работе Марсдена и Вильямса было показано, что критический аргумент $\sigma' = n_V \lambda - n \lambda_V - \pi$ (где n_V и λ_V — параметры, относящиеся к Венере) обнаруживает временную либрацию. Значение σ' , составляющее в настоящее время 206° , совершило в прошлом иолтора цикла между значениями 79° (которого достигло в 1816 г.) и 355° (в 1949 г.). Теперь σ' растет и достигнет несколько иного максимального значения, 342° , в 2021 г., а затем будет продолжать либрацию с периодом около 200 лет со все уменьшающейся амплитудой (хотя и неясно, как долго).

Хотя вычисления Марсдена и Вильямса охватывают не слишком большой интервал времени (несколько столетий), они предполагают существование связи между соиз-

меримостью в движении астероида с Землей и Венерой на больших временных промежутках. Эта связь подтверждается расчетами Х. Шолла (1976), охватывающими интервал в 17 000 лет, основанными, правда, на менее точных элементах орбиты астероида. Указанием на наличие такой связи является существование почти точной соизмеримости между средней скоростью движения узлов орбиты астероида ($-18''/\text{год}$) и двумя главными членами вековых возмущений Земли и Венеры, на что обратили внимание Марсден и Вильямс.

Подобная связь сразу с движением двух планет заслуживает особого внимания, и мы еще вернемся к этому вопросу.

Гипотетические «трояницы» Земли. Хотя крупные тела на малых орбитах стали известны недавно, вопрос об устойчивости подобных орбит рассматривался неоднократно. П. Вайсман и Дж. Везерилл (1974) на основании модельных расчетов проанализировали эволюцию орбит, весьма близких к земной, в ограниченной задаче трех тел. Другими словами, ими была проанализирована проблема существования земных «трояниц» в системе Солнце — Земля, т. е. астероидов в резонансе 1 : 1 с Землей.

Начальное положение тела на орбите задавалось в этих расчетах гелиоцентрическим расстоянием $d_0 \gtrsim 1$ а.е. вблизи одной из лагранжевых точек (L_4) на линии, соединяющей эту точку и Солнце. Было получено, что при $1 \lesssim d_0 < 1,0028$ а.е. и эксцентриситете орбиты тела $e \approx \approx 3 \cdot 10^{-6}$ тело либрирует около лагранжевой точки, описывая во вращающейся вместе с Землей системе координат периодическую орбиту типа «головастик», размеры которой растут по мере роста d_0 . При $d_0 = 1,00285$ хвост «головастика» вытягивается столь сильно, что тело может удаляться от Земли на $\Delta\lambda \approx 180^\circ$, а при дальнейшем росте d_0 тип орбиты меняется на «нодкову», так что тело обходит последовательно обе точки Лагранжа (рис. 34). Этот характер движения вполне аналогичен характеру либрации Троянцев в системе Солнце — Юпитер, описанному Э. Эверхартом (§ 5), но все разнообразие движений осуществляется у гипотетических земных троянцев при гораздо меньшей дисперсии орбит. Период либрации земных троянцев согласно расчетам должен составлять несколько сотен лет и сильно зависеть от d_0 .

При $d_0 > 1,008$ а. е. тело во время либрации может приближаться к Земле на расстояния $\Delta < 0,1$ а. е. и, попадая в сферу ее влияния, испытывать сильные возмущения. В результате орбита тела может резко меняться. Результат подобного сближения с Землей иллюстрирует рис. 34 при $d_0 = 1,014$ а. е. Сначала тело быстро описы-

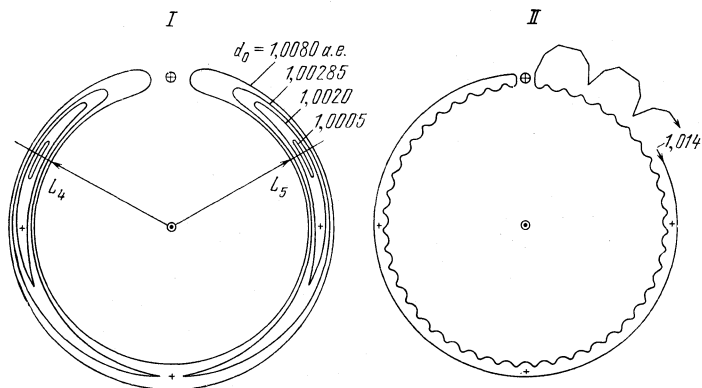


Рис. 34. Либрация гипотетических земных «троянцев» относительно Земли. I — устойчивые орбиты типа «головастика» и «подковы», II — неустойчивая орбита. (По П. Вайсману и Дж. Везериллу, 1974.)

вает орбиту типа «подкова» с $a = 1,014$ а.е. и $e = 4 \cdot 10^{-6}$ и приближается к Земле на расстояние $\Delta = 0,034$ а. е. В результате этого сближения большая полуось орбиты уменьшается до $a = 0,985$ а. е., а эксцентриситет возрастает до $e = 5 \cdot 10^{-3}$. Тело продолжает либрацию по внутренней стороне «подковы» до следующего тесного сближения с Землей ($\Delta = 0,012$ а. е.), которое приводит к скачку большой полуоси до значения $a = 1,014$ а.е. и эксцентриситета до $e = 3 \cdot 10^{-2}$. Тело прекращает либрировать, но еще продолжает циркулировать в окрестностях земной орбиты, испытывая все новые тесные сближения с Землей, ведущие к дальнейшим прогрессивным изменениям элементов орбиты.

П. Вайсман и Дж. Везерилл показали, что при $d_0 < 1,0020$ а. е. орбита тела остается устойчивой и амплитуда либраций около лагранжевой точки невелика.

Попытка учесть влияние возмущений со стороны других планет привела к неожиданному результату. Полагая, что наиболее велики возмущения от Венеры и Юпитера и наложив на них некоторые ограничения (приняв орбиты планет круговыми и компланарными), Вайсман и Везерилл провели модельные расчеты для нескольких значений d_0 (1,0010, 1,0015, 1,0020, 1,0025, 1,0027 и 1,0028) на интервале времени, охватывающем $5 \cdot 10^3$ лет. Во всех случаях не было получено никакого изменения амплитуды либрации. Для случая $d_0 = 1,0020$ а. е. интегрирование было продолжено до 10^4 лет, что охватывало 40 периодов либрации, но амплитуда либрации по-прежнему не изменилась. Это позволило Вайсману и Везериллу предполагать устойчивость орбит с $d_0 \leq 1,0020$ а. е. на промежутках времени по крайней мере на порядок больших, т. е. на промежутках времени в 10^5 лет.

Предварительный анализ влияния эксцентриситета земной орбиты и наклона орбиты либрирующего тела показал, что это влияние на эволюцию орбиты мало.

П. Вайсман и Дж. Везерилл на основании проведенных расчетов допускают существование реальных земных «троянцеv» и считают целесообразным их специальный поиск.

Э. Эннк (1976) подошел к анализу той же проблемы в терминах геоцентрической скорости объекта и ее хаотизации в результате сближений с Землей. Обсуждая характер изменения орбит, существенно отличающихся от орбиты Земли, он пришел к выводу об их неустойчивости: после кратковременной либрации (с периодом в десятки лет) тело должно выйти из либрации. Это согласуется с результатами анализа орбит типа «подкова», полученными Вайсманом и Везериллом. В реальных условиях влияние эксцентриситета орбиты Земли и наклона орбиты тела уже должно привести к хаотизации возмущений при тесных сближениях с Землей. Накопление этих возмущений может превратить орбиту тела в скрещивающуюся с орбитой Венеры и Марса, а в дальнейшем даже с орбитой Юпитера.

Поведение тел на орбитах, очень близких к земной, Эннк детально не рассматривал. Но, отметив, что область существования земных троянцев (т. е. ширина резонансной зоны в системе Солнце — Земля) очень мала, он высказал

предположение, что пахождение тел в этой зоне певе-
роятно. Результаты Вайсмапа и Везерилла, касающиеся
особенностей поведенья тел па орбитах, очень близких к
земной, остались, но-видимому, неизвестными Эпику.

Итак, продолжительность либрации земных «троянцев»
очень мала и не может существенно продлить жизнь та-
ких объектов. Поэтому время жизни объекта, находившего-
ся в либрации, тоже должно быть норядка 10^7 лет. За та-
кое время объект, нобывавший в либрации, как и прочие
объекты во внутренних районах Солнечной системы, либо
столкнется с одной из планет, либо будет выброшен за
пределы планетной системы. Вайсман и Везерилл действи-
тельно наблюдали при модельных расчетах, продолжен-
ных на большие промежутки времени, столкновения с
Землей тел, находившихся первоначально на либрирую-
щих орбитах типа «подкова» с большими d_0 .

Очевидно, тела могут попадать на временные либрирую-
щие орбиты точно так же, как и покидать их. Если рас-
сматривать состояние либрации как этап замедленной
эволюции орбиты в общем ходе ее прогрессивных измене-
ний, то нельзя ожидать сколько-нибудь заметного скон-
ления тел на орбитах типа «подкова» и на неустойчи-
вых орбитах типа «головастик» с $d_0 \geq 1,0020$ а. е. из-за
очень малого времени пребывания в состоянии либрации.
Что же касается скапливания тел на более устойчивых ор-
битах типа «головастик» с $d_0 < 1,0020$, а. е., то вопрос ос-
тается пока открытым. Если даже резонанс с Землей у
тел па орбитах такого типа длится всего $\sim 10^5$ лет (т. е.
порядка 0,01 времени жизни тела во внутренних районах
Солнечной системы), то и тогда можно ожидать, что в со-
стоянии резонанса (или либрации) в настоящее время
«застряло» около 1% тел из общего числа приближающих-
ся к орбите Земли, оцениваемого в $\sim 10^3$. Это значит, что
число земных троянцев может достигать ~ 10 .

Если земные троянцы действительно существуют, то
орбиты, близкие к круговым, и/или орбиты малых размер-
ов можно рассматривать как орбиты, которые еще «пом-
нят» резонанс с Землей или в будущем могут оказаться
в состоянии резонанса с Землей. Доля таких орбит для
астероидов и для метеоритов (§ 10) составляет $\sim 10\%$.
Она слишком велика, чтобы ее можно было объяснить
случайными факторами.

Заметим, что такие негравитационные эффекты, как эффект Пойнтинга — Робертсона или более мощный эффект Ярковского — Радзиевского не мешают телам километровых или даже метровых размеров оставаться в зоне устойчивой либрации ($0,998 < d < 1,002$ а. е.) в течение $\sim 10^5$ лет.

Модельные расчеты эволюции орбит малых размеров сталкиваются с большими трудностями, если эти расчеты ведутся на промежутках времени $\sim 10^4$, поскольку накопление ошибок интегрирования влечет за собой изменения орбиты того же порядка, что и случайные возмущения и/или вековые и периодические возмущения орбит, на что неоднократно указывали разные исследователи. Тем не менее исследования орбит подобного типа представляют несомненный интерес, поскольку могут помочь выявить те или иные характерные черты эволюции орбит, остающейся до сих пор неясной.

Кратные резонансы. Исследования движений астероидов групп Аполлона и Амура позволили выявить у многих из них (точнее, у большинства этих астероидов с хорошо известными орбитами) существование резонансного характера движения по отношению сразу к нескольким планетам. Впервые это было обнаружено для астероида (1685) Торо. Л. Даниельсон и У.-Х. Ин (1972) показали, что Торо движется вблизи соизмеримости $5 : 13$ с Венерой и $5 : 8$ с Землей. Оказалось, что движение Торо по отношению и к Земле и к Венере является резонансным, а соизмеримость становится более острой поочередно то с одной, то с другой планетой.

Позднее П. Яничек и др. (1972) проанализировали движение уже ряда астероидов групп Аполлоиа и Амура и показали, что подобный кратный резонанс характеризует движение астероидов (887) Алинда, (433) Амур и многих других (табл. 2). Детальные численные расчеты эволюции орбит на интервале в несколько сотен лет позволили выяснить механизм сохранения резонанса, который схематически может быть описан следующим образом. В течение нескольких десятков лет энергия «нодкачивается» астероиду одной из планет, и это приводит к улучшению соизмеримости движения астероида с другой планетой. Затем накопленная избыточная энергия отбирается второй планетой, и соизмеримость с нею ухудшается. Зато

Таблица 2

Кратные соизмеримости и резонансы астероидов
групп Аполлона и Амура

Астероид	Период обра- щения	Резонанс с				Источник
		Вене- рой	Землей	Мар- сом	Юпи- тером	
(433) Эрос	1,76	1 : 3	4 : 7			Япичек и др., 1972
(887) Алинда	3,99	2 : 13	1 : 4	8 : 17	3 : 1	то же
(1036) Ганимед	4,33	1 : 7	3 : 13	10 : 23		»
(1221) Амур	2,67	3 : 13	3 : 8	12 : 17	9 : 2	»
(1566) Икар	1,12	5 : 9	8 : 9			»
		6 : 11	17 : 19			»
		11 : 20				»
(1580) Бетулия	3,25	3 : 16	4 : 13	11 : 19		»
(1620) Географ	1,39	4 : 9	5 : 7			»
			13 : 18			»
(1627) Ивар	2,55	1 : 4	2 : 5	17 : 23		»
(1685) Торо	1,60	5 : 13	5 : 8	20 : 17		»
(1862) Аполлон	1,78	1 : 3	4 : 7			»
(1864) Дедал	1,77	1 : 3	4 : 7			»
(1915) Кетцаль- коатль	4,00				3 : 1	Марсден, 1975
1976 AA	0,95	11 : 17	20 : 19			Марсден и Вильямс, 1977

улучшается соизмеримость с первой планетой. Этот процесс повторяется неоднократно, и прогрессивная эволюция орбиты астероида задерживается.

Не исключено, что движение в режиме кратного резонанса предохраняет астероиды от «случайных» встреч с планетами. Если это может существенно продлить жизнь астероидов, то члены групп Аполлона и Амура — в основном старые астероиды с возрастом $\geq 10^7$ лет, постепенно скопившиеся во внутренних районах Солнечной системы.

Следует заметить, однако, что сохранение кратного резонанса на больших промежутках времени не доказано (Вильямс и Везерилл, 1973) и требует дальнейших исследований. Обнаружение соизмеримости в вековых возмущениях астероида 1976 AA с Землей и Венерой (Марсден и Вильямс, 1977) показывает целесообразность таких исследований.

§ 7. Физические свойства астероидов

Размеры, массы, альbedo. Астероиды так малы, что различить диск удается лишь у немногих из них. Э. Барнард измерил угловые диаметры первых четырех астероидов, Цереры, Паллады, Юноны и Весты, в 1901—1902 гг., используя нитяной микрометр на 90- и 100-сантиметровом рефракторах, и оценил линейные диаметры этих астероидов в 770, 490, 195 и 390 км соответственно. В дальнейшем попытки измерить диаметры этих и некоторых других астероидов повторялись неоднократно, но так как видимые диски астероидов лежат на пределе разрешения, это приводило к различным результатам, иногда вдвое отличающимся друг от друга (Дольфюс, 1971).

Существенной помехой при измерениях диаметров астероидов является турбулентция земной атмосферы. Только в 70-х гг. удалось преодолеть связанную с этим трудность измерений, когда появились новые усилители оптических изображений, которые сделали возможным получение мгновенных снимков слабых астрономических объектов. Современные ЭВМ позволили объединить серию последовательно полученных изображений в одно, устранив при этом атмосферные искажения, как помехи или шум (рис. 35). Метод получил название спекл-интерферометрии. Применяв его к астероидам, С. Уорден и др. (1977) определили диаметр Весты и нашли, что он равен 513 ± 51 км.

В нескольких случаях размеры астероидов, точнее, их нижний предел, были оценены по продолжительности покрытия астероидами звезд.

Массы крупнейших астероидов удалось оценить на основании анализа их взаимных возмущений при сближениях друг с другом. Таким способом И. Шубарт (1971, 1974) получил значение массы $M = 1,2 \cdot 10^{24}$ г для Цереры, $2,3 \cdot 10^{22}$ г для Паллады и $2,4 \cdot 10^{22}$ г для Весты.

В подавляющем же большинстве случаев размеры астероидов оценивают по их блеску, а массы — на основании полученных размеров и предположения о той или иной плотности астероидного вещества.

Для этого сначала определяют абсолютную звездную величину астероида, т. е. звездную величину, которую имел бы астероид в противостоянии (при нулевом фазовом

угле) на единичном расстоянии от Солнца и от Земли, равном 1 а. е.

Абсолютные звездные величины астероидов выражают в Международной фотографической системе, обозначая их через g , или в более употребительной для слабых объектов фотометрической системе UBV , обозначая их через

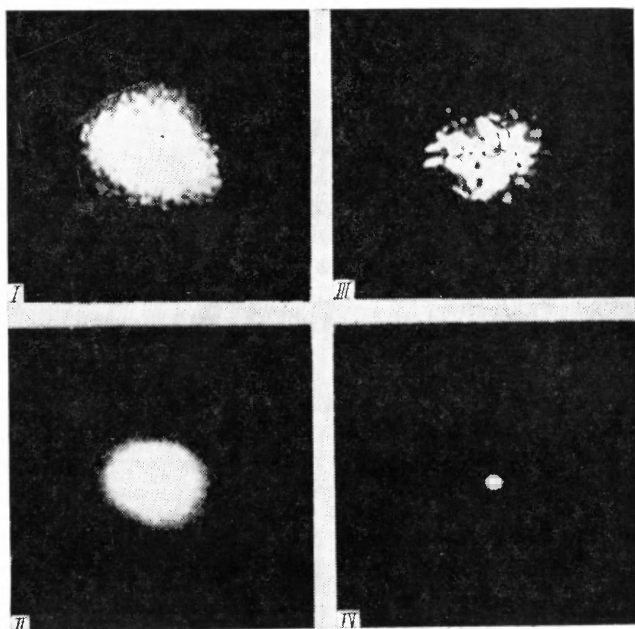


Рис. 35. Иллюстрация возможностей спекл-интерферометрии. Показано одно из мгновенных изображений Весты (I) и результат математической обработки серии таких изображений (II). Справа — то же для звезды α Ориона (III, IV). Обращает на себя внимание неправильная форма Весты. (По С. Уордену и др., 1977.)

$B(1,0)$. Обозначение второй системы складывается из обозначений трех областей спектра (ультрафиолетовой, голубой и визуальной), в которых регистрируется блеск астероидов. Значения $B(1,0)$ для нумерованных астероидов, полученные на основании Мак-Доналдского обзор-

ния, приводятся в «Эфемеридах малых планет», ежегодно издаваемых ИТА.

Переход от одной системы к другой осуществляется с помощью соотношения (Герелс, 1974)

$$B(1,0) = g - [B(1,0) - V(1,0)] + 0^m,176.$$

Показатели цвета астероидов $B(1,0) - V(1,0)$ заключены в пределах от $+0^m,70$ до $+0^m,96$, и потому величина $B(1,0)$ с точностью до $\pm 0^m,01$ равна $g + 0^m,10$.

Если принять, что астероид имеет сферическую форму, то его радиус ρ , выраженный в астрономических единицах, будет связан с величиной g и геометрическим альбедо *) p астероида соотношением

$$\lg \rho = 0,2 G - 0,5 \lg p - 0,2 g, \quad (3)$$

где $G = -26^m,20$ — звездная величина Солнца в Международной фотографической системе.

Определить альбедо астероидов тем способом, которым определяют альбедо больших планет (см. Мартынов, 1979), оказывается невозможно, потому что астероиды из-за их слабого блеска удается наблюдать лишь около противостояния, на небольших фазовых углах. Для первых четырех астероидов значения альбедо оценили с помощью соотношения (3), считая их размеры известными. Среднее из четырех полученных значений, а именно $p = 0,24$, в дальнейшем использовали для определения размеров остальных астероидов.

Подставляя $p = 0,24$ в соотношение (3) и выражая ρ в километрах, получим

$$\lg \rho = 3,245 - 0,2 g.$$

Приняв среднюю плотность астероидного вещества равной 3 г/см^3 , получим выражение для массы астероида, выраженной в граммах:

$$\lg M = 25,834 - 0,6 g.$$

Такой оставалась ситуация вплоть до 70-х гг., когда были разработаны два оригинальных метода определения

*) Геометрическое альбедо астероида — это отношение его блеска в противостоянии к блеску абсолютно белого диска того же радиуса, расположенного на том же расстоянии перпендикулярно к солнечным лучам.

размеров и альbedo астероидов, сыгравших огромную роль в выяснении физической природы астероидов.

Один из этих методов, поляриметрический, позволяет определить альbedo астероидов поперечниками до нескольких десятков километров. Он основан на эмпирическом соотношении, выявленном Т. Вайдорном (1967) на основании многочисленных экспериментов с земными веществами, лунным грунтом и метеоритами. Вайдорн показал, что существует корреляция между отражательными свойствами поверхности и степенью поляризации отраженного от нее света при разных фазовых углах.

Солнечный свет, отраженный от поверхности астероидов, тоже оказывается частично поляризован. Насколько он будет поляризован, зависит от угла, под которым свет падает на отражающую поверхность, и от того, чем сложена поверхность, в частности, от свойств кристаллов, внутрь которых он проникает. Из-за неровностей поверхности, наличия на ней разного рода обломков, свет может испытывать многократные отражения, и при каждом из них степень его поляризации все больше растет.

Степень поляризации U определяется из соотношения $U = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$, где I_1 — интенсивность света, у которого электрический вектор перпендикулярен к плоскости Солнце — астероид — Земля, а I_2 — интенсивность света, поляризованного в плоскости, совпадающей с плоскостью Солнце — астероид — Земля. Измеряя U ночь за ночью, когда фазовый угол меняется вследствие движения астероида и Земли по своим орбитам, можно построить кривую поляризации $U(\alpha)$ (рис. 36).

Как показывают наблюдения, $U = 0$ при $\alpha = 0$. С ростом α значение U сначала падает, становясь отрицательным, достигает пологого минимума, а затем начинает возрастать. Начиная с $\alpha \approx 15^\circ$, степень поляризации растет линейно с фазовым углом, причем угол наклона h восходящей ветви кривой поляризации в этой области, как установил Вайдорн, весьма чувствителен к альbedo и слабо зависит от других факторов. Это и позволило оценить альbedo астероидов, опираясь на лабораторные определения h в зависимости от p .

Большой ряд поляриметрических наблюдений астероидов был организован Т. Герелсом из Аризонского универ-

ситета США *). Анализ кривых поляризации позволил определить p для нескольких десятков астероидов.

Второй метод известен как радиометрический метод определения размеров астероидов. Он был предложен Д. Алленом (1970) и Д. Матсопом (1971), а затем был развит и применялся Д. Моррисоном, О. Хансеном и другими

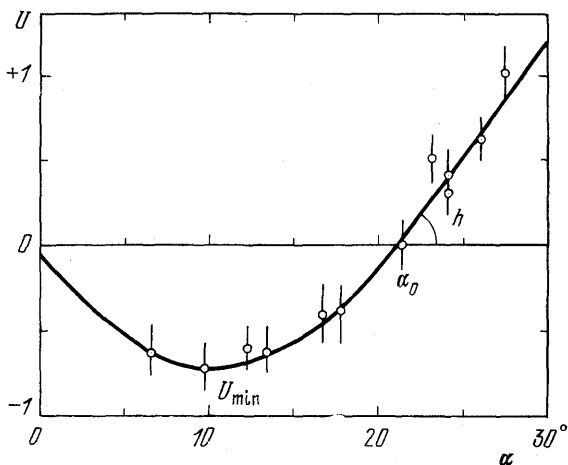


Рис. 36. Кривая поляризации астероида (15) Эвномия.

исследователями **). Недавно он был подробно описан Д. Моррисоном (1977в).

Сущность метода заключается в сравнении блеска астероида в видимой области спектра с тепловым излучением астероида в инфракрасной области (обычно в области 10—20 мкм). При заданных размерах астероид оказывается тем ярче в видимой области спектра, чем больше его альbedo. Но вместе с тем, чем больше альbedo астероида, тем холоднее будет астероид, потому что тем меньшая доля падающего на него солнечного излучения будет поглощаться астероидом. Соответственно этому меньшая

*) См. Веверка (1974), Боуэлл и др. (1972), Боуэлл и Цельнер (1974), Веверка и Ноланд (1973), Цельнер и др. (1974), Цельнер и Градье (1976).

***) См. Моррисон (1973), Хансен (1973), Джонс и Моррисон (1974), Моррисон (1977а).

доля энергии будет переизлучаться астероидом в виде тепловой энергии. Это позволяет исключить альбедо из уравнений, связывающих звездную величину астероида в видимой области спектра и его инфракрасное излучение с потоком падающего на астероид солнечного излучения. После этого можно определить диаметр астероида, т. е. такой диаметр, который астероид должен иметь, чтобы обеспечить наблюдаемый с него поток теплового излучения.

Вообще говоря, при этом приходится делать некоторые предположения. Так, при расчетах потока тепловой энергии с астероида необходимо сделать предположение о распределении температур на его поверхности. Обычно считают, что поверхность астероида сложена веществом с малой теплопроводностью*), так что в каждой точке освещаемой Солнцем поверхности поверхностная температура астероида находится в равновесии с поглощаемой солнечной энергией.

Радиометрическим методом были определены диаметры около 200 астероидов. Но трудности калибровки метода (связанные с необходимостью ностулирования болометрической излучательной способности вещества и зависимости инфракрасного потока от фазового угла, с необходимостью калибровки самого инфракрасного потока и др.) привели сначала к тому, что диаметры, определенные разными последователями, оказались систематически различающимися между собой. Альбедо астероидов, найденные по радиометрическим диаметрам, обнаруживали систематическое отличие от поляриметрических альбедо.

В конце 70-х гг. дальнейшая разработка обоих методов позволила устранить эти различия (Моррисон, 1977в; Цельнер и др., 1977в, г; Хапсен, 1977) и получить согла-

*) Инфракрасные наблюдения астероида (433) Эрос (Моррисон, 1976а), а также спутника Марса Фобоса (Гатлей и др., 1974) и галилеевых спутников Юпитера (Моррисон и Крукшенк, 1973; Хапсен, 1973) показали, что поверхности этих малых тел необычайно быстро реагируют на изменение потока солнечного света. Это показывает, что они имеют малую теплопроводность — ниже, чем у всех естественных материалов, встречающихся на Земле, и даже ниже, чем у лунной поверхности, являющейся прекрасным теплоизолятором. Таким образом, это положение радиометрического метода справедливо по крайней мере для подобных объектов.

Таблица 3

Крупнейшие астероиды

Астероид	Класс	D, км	Астероид	Класс	D, км
(1) Церера	C	1003	(324) Бамберга	C	246
(2) Паллада	U	608	(532) Геркулина	S	243
(4) Веста	U	538	(24) Фемида	C	234
(10) Гигия	C	450	(95) Аретуза	C	230
(31) Евфросина	C	370	(45) Евгения	C	226
(704) Интерамния	C	350	(13) Эгерия	C	224
(511) Давида	C	323	(19) Фортуна	C	215
(65) Кибела	C	309	(107) Камилла	C	211
(52) Европа	C	289	(409) Аспасия	C	211
(451) Пациенция	C	276	(88) Тисбе	C	210
(15) Эвномия	S	272	(7) Ирис	S	209
(16) Психея	M	250	(747) Винчестер	C	205
(48) Дорис	C	250	(702) Алауда	C	205
(92) Ундина	C	250	(41) Дафния	C	204
(3) Юнона	S	247	(6) Геба	U	201
			(241) Германия	C	200

сованные между собой значения диаметров и альbedo более 200 астероидов, приведенные в Приложении 3.

Выяснилось, что первые четыре астероида значительно крупнее, чем получалось по измерениям их видимых дисков. У Цереры диаметр оказался превышающим 1000 км — почти на $\frac{1}{4}$ больше принимавшегося до сих пор. Оказалось, что в кольце астероидов движется 14 объектов крупнее 250 км (выявлены, по-видимому, все такие объекты) и еще 17 объектов размерами 200—250 км (не исключено, что еще будут выявлены столь же крупные объекты). Список этих крупнейших астероидов приведен в табл. 3. Большая часть их — очень темные объекты, размеры которых недооценивались, поскольку им приписывались большие значения альbedo. По этой причине Юнона, занимающая 15-е место, еще недавно ошибочно считалась третьим по величине астероидом.

На основании поляриметрических и радиометрических исследований выяснилось, что распределение астероидов по альbedo является бимодальным (рис. 37). Уверенно различаются две группы астероидов, разделенные неболь-

шим промежутком около $p \approx 0,06$. Более компактной является группа темных астероидов с медианным значением альbedo $p = 0,035$. Частично дисперсия значений p у этих астероидов, по мнению Д. Моррисона (1977в), может быть обусловлена ошибками наблюдений, особенно в области $p < 0,025$. Но у некоторых хорошо наблюдавшихся астероидов установлены реальные и весьма значи-

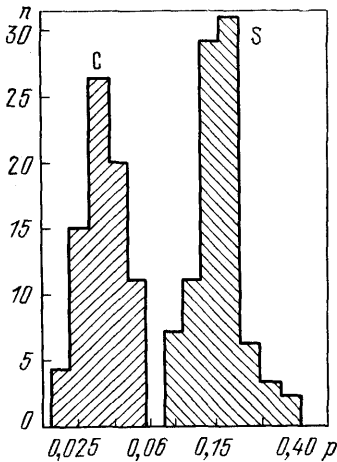


Рис. 37. Распределение визуальных геометрических альbedo 187 астероидов. Группа низких альbedo образована С-астероидами, группа высоких альbedo — в основном S-астероидами. (По Д. Моррисону, 1977в.)

тельные различия альbedo. Так, у Цереры $p = 0,054$, тогда как у (19) Фортуны, (52) Евроны и (324) Бамберги $p \approx 0,030$. Поверхность последних трех астероидов сложена столь темным веществом, что по количеству отражаемого света с ним может соперничать даже раздробленный черный уголь. Поверхность астероидов (65) Кибелы, (595) Шейлы и некоторых других еще чернее. Это едва ли не самые темные объекты Солнечной системы.

Аналогами вещества, слагающего поверхность темных астероидов, являются темные базальтовые стекла, темные базальтовые брекчи лунных образцов, а также углистые метеориты. Поэтому темные астероиды условно называют *углистыми*, или *С-астероидами*, не предполагая при этом

однородности вещества всего астероида. Из 31 крупнейших астероидов С-астероидами являются 23, т. е. 75%.

Более светлые астероиды образуют вторую группу с медианным значением альbedo $p = 0,15$. Самым светлым среди изученных астероидов оказался астероид (44) Низа с альbedo $p = 0,377$, более чем на порядок превышающим альbedo самых темных астероидов класса С. Низа — это довольно крупный астероид поперечником около 80 км. Немного уступают Низе по отражательным

свойствам (64) Ангелина и (434) Венгрия размерами в 56 и 11 км соответственно.

Аналогами вещества, слагающего поверхность большинства светлых астероидов, являются камни силикатного состава и, в частности, каменные метеориты, почему такие астероиды и пазваны *каменными*, или *S-астероидами*.

Большой неожиданностью было обнаружение астероидов, поверхность которых обладает специфическими поляризационными свойствами, характерными для металлов, и, вероятно, действительно содержащих в поверхностных слоях большую примесь осколочного металлического материала. Такими астероидами оказались (21) Джулия, (16) Психея и некоторые другие, выделенные в группу *металлических*, или *M-астероидов*. На рис. 37 M-астероиды попали в группу светлых астероидов.

Радиометрическим и поляриметрическим методами получены статистически представительные результаты для астероидов диаметрами вплоть до 80 км. Учет наблюдательной селекции, благоприятный для объектов с большим блеском (а следовательно, для объектов с высоким альбедо и малым гелиоцентрическим расстоянием) позволил Д. Моррисону (1977в) оценить полное число астероидов размерами вплоть до 80 км во всем кольце астероидов в 800. С-астероиды оказались преобладающими во всех интервалах размеров. Соотношение числа объектов в классах C, S, M для астероидов крупнее 200 км составляет 75 : 14 : 4, а для астероидов размерами 200—80 км — 81 : 12 : 3, т. е. почти такое же, как и для крупнейших астероидов. Хотя в группу астероидов средних размеров могли попасть продукты дробления более крупных, это, как видно, не отразилось на соотношении числа астероидов разных классов.

Забегая вперед, заметим, что спектральные исследования выявили столь характерные особенности в спектрах астероидов разных классов, что классифицировать астероиды оказалось возможным на основании данных одной только *UBV*-фотометрии. Воспользовавшись этим, Б. Цельпер и Э. Боуэлл (1977д) увеличили список классифицированных астероидов до 359. Размеры астероидов, классифицированных по данным *UBV*-фотометрии, оценивались затем по значению альбедо, являющемуся

модальным для астероидов соответствующего класса. Результаты этих оценок также приведены в Приложении 3. Статистически обеспеченными оказались результаты для астероидов размерами вплоть до 50 км. Соотношение между числом астероидов классов C, S, M Цельнер и Боуэлл оценили как 76 : 16 : 5, что мало отличается от оценок Моррисона. Около 3% астероидов обладают особенностями, не позволяющими отнести их ни к одному из этих классов. Общее число астероидов размерами > 50 км Цельнер и Боуэлл оценивают в 560. Это ниже оценки Моррисона, что Цельнер и Боуэлл объясняют завышением Моррисоном числа C-астероидов (главным образом на больших орбитах).

Химический и минералогический состав поверхностных слоев астероидов. Их структура. Ценную информацию удалось получить, анализируя спектральный состав света, отраженного астероидами. Обычно спектральные наблюдения проводятся с помощью узкополосных фильтров. Уже первые такие наблюдения, проводившиеся еще в 1929 г. Н. Бобровниковым на Ликской обсерватории, показали, что спектры разных астероидов резко различаются между собой. Об этом же свидетельствовало и определение цвета астероидов, начатое в 30-х гг. в СССР Е. Л. Криновым.

Систематические спектральные исследования астероидов были начаты группой американских ученых под руководством К. Ченмена и Т. Мак-Корда в 1970 г. (Мак-Корд и др., 1970; Ченмен и др., 1971, 1973; Мак-Корд и Ченмен, 1975а, б). На обсерваториях Китт-Пик и Паломарской с помощью разных телескопов (включая 200-дюймовый телескоп Паломарской обсерватории) для многих десятков астероидов были получены спектры, охватывающие как видимую, так и инфракрасную области (0,3—1,1 мкм). При этом применялись 24 узкополосных фильтра.

Примеры полученных спектров показаны на рис. 38. Бросается в глаза и огромное различие в спектральном альбедо разных астероидов, и разная общая форма спектральных кривых.

К концу 1978 г. К. Ченмен, Т. Мак-Корд и другие исследователи, непрерывно совершенствуя методику наблюдений, получили спектры более 300 астероидов (Герелс, 1979).

Как и при других методах исследований астероидов, интерпретации полученных результатов предшествовала большая экспериментальная работа. В лабораторных условиях были получены и исследованы спектры отражения земных горных пород, лунного материала, метео-

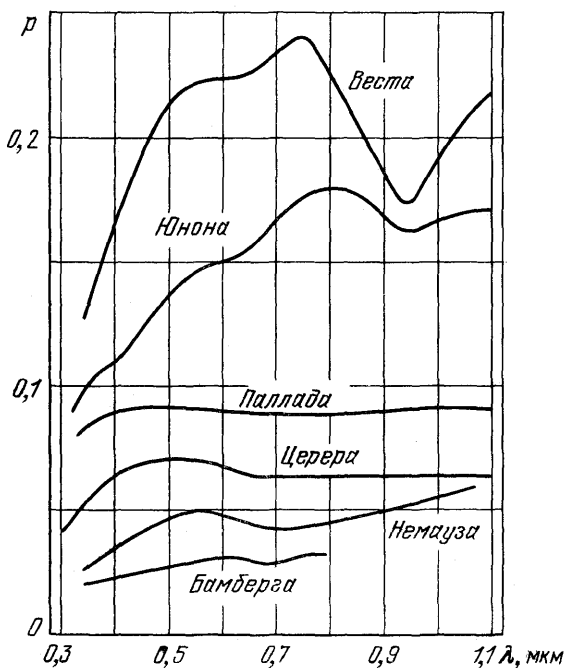


Рис. 38. Спектры отражения шести астероидов, нормированные по геометрическому альбедо, найденному из независимых наблюдений.

ритного вещества, а также чистых минералов. На основании этих экспериментов, сопровождавшихся теоретическими изысканиями, был выявлен ряд особенностей спектров, характерных для тех или иных минералов и их смесей (Мак-Корд и Ченмен, 1975а). Появление таких особенностей в спектрах астероидов является диагностическим и указывает на присутствие соответствующих веществ в поверхностных слоях астероидов. Такими являют-

ся, в частности, полосы поглощения, обусловленные взаимодействием света с ионами железа и других металлов, входящих в состав прозрачных минералов.

Диагностическим признаком является поведение инфракрасного конца спектра. Дело в том, что около $1,05 \text{ мкм}$ лежит основная полоса поглощения оливина, широко распространенного в каменных метеоритах. Поэтому завал инфракрасного конца спектра может указывать на присутствие на астероиде значительных количеств этого минерала. В длинноволновой части спектра лежит и полоса поглощения пироксена. Изменение состава пироксена (например, его железистости) приводит к смещению полосы поглощения. Поэтому длина волны полосы поглощения пироксенов указывает и на их состав.

Большое значение для расшифровки пироксеновых полос имели лабораторные изыскания, в ходе которых было установлено, что пироксены разных составов имеют полосы поглощения в области $0,90\text{--}1,02 \text{ мкм}$, повторяющиеся в области $1,85\text{--}2,30 \text{ мкм}$ (Адамс, 1974). Это позволило построить пироксеновую кривую, показанную на рис. 39. По осям координат указаны длины волн, соответствующие серединам полос поглощения пироксенов разного состава.

С помощью пироксеновой кривой можно уверенно идентифицировать состав пироксена, если наблюдения охватывают область $0,9\text{--}2,3 \text{ мкм}$. Других минералов, кроме пироксенов, которые давали бы полосы поглощения в области $\sim 2 \text{ мкм}$, не найдено. Поэтому, если полоса, обнаруженная в области $0,9\text{--}1,02 \text{ мкм}$, не имеет аналога в более длинноволновой области, то это может служить указанием на присутствие одного минерала, который нуждается в идентификации.

Непрозрачные минералы и металлы подавляют излучение в области $0,56 \text{ мкм}$. В их присутствии на спектральной кривой появляется небольшой горб.

Анализ спектров астероидов позволил на основании подобных диагностических признаков определить минералогический состав вещества, слагающего поверхность многих астероидов. В некоторых случаях определено даже процентное содержание разных минералов в астероидном веществе и процентное содержание отдельных элементов (железа, магния и др.),

Инфракрасные наблюдения оказались особенно важными для изучения С-астероидов. В 1978 г. Л. Лебовский (1978) впервые обнаружил в их инфракрасных спектрах полосу поглощения, характерную для воды, с центром около 3,0 мкм. Эта полоса уверенно наблюдалась в спектре Цереры, в спектре Паллады и в спектрах еще десяти С-астероидов. Те же наблюдения показали, что в спектрах S-астероидов эта полоса отсутствует.

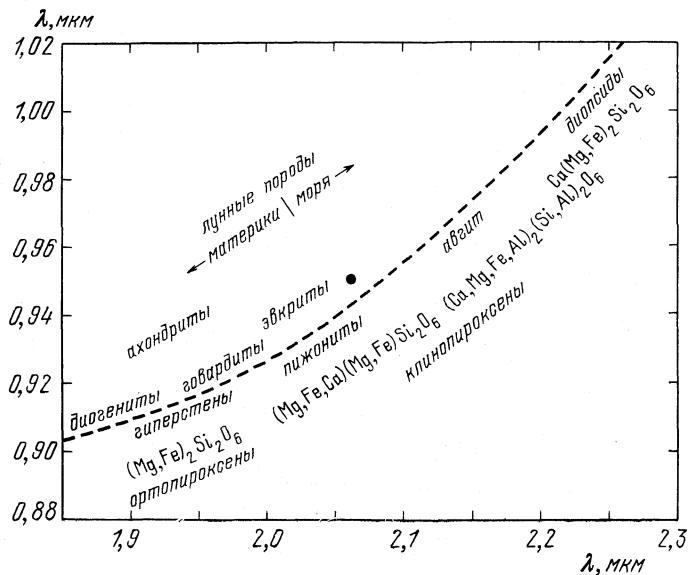


Рис. 39. Пироксеновая кривая Адамса. Пояснения в тексте.

Лебовский обратил внимание на то, что его наблюдения не согласуются с предположением (делавшимся ранее на основании наблюдений в видимой области) о том, что Церера сложена сильно метаморфизованным веществом типа С4 (сходным с веществом метеорита Карунда). Он указал, что результаты наблюдений в видимой и инфракрасной областях согласуются скорее с присутствием на Церере вещества типа С2. К такому же результату пришли Х. Ларсон и др., сопоставляя полученные ими инфракрасные спектры Цереры с результатами Лебовского и с опубликованными другими исследователями спектрами

Цереры в видимой области (Герелс, 1979). Однако М. Гаффей заметил, что в ультрафиолетовой области спектра Цереры отсутствует полоса поглощения, характерная для вещества метеоритов типа С2. На этом основании он предположил, что Церера сложена гидратированным веществом, бедным металлом и богатым непрозрачными компонентами, отличными от вещества каких бы то ни было метеоритов (Герелс, 1979).

Особый интерес представляют результаты спектральных исследований Весты. Уже первые спектральные наблюдения показали, что спектр Весты похож на спектры отражения базальтовых ахондритов (Мак-Корд и др., 1970). Об этом свидетельствовала очень глубокая полоса поглощения пироксенов, расположенная около 0,9 мкм (см. рис. 38). Дальнейшие исследования позволили уточнить положение этой полосы и подтвердили сходство поверхностных слоев Весты с веществом эвкритов (Чепмен, 1971; Джонсон и др., 1975; Мак-Фаден и др., 1977). Х. Ларсон и У. Финк (1975) провели наблюдения Весты на 1,6- и 2,3-метровом телескопах с фурье-спектрометрами в области 1—5 мкм и обнаружили полосу поглощения пироксенов в области ~ 2 мкм. Новая техника наблюдений позволила Ларсону и Финку очень точно определить положение центра этой полосы поглощения, а поскольку в области 2 мкм нет других минералов, дающих поглощение, исключалась трудность, связанная с возможным влиянием других минералов, чего можно опасаться в области $\sim 0,9$ мкм.

Это позволило уверенно определить состав пироксенов Весты, пользуясь пироксеновой кривой и другими калибровочными кривыми Дж. Адамса. Ларсон и Финк пришли к выводу, что пироксен Весты является очень железистым и на 75% состоит из FeSiO_3 . Около 15% могут принадлежать CaSiO_3 , а остальные 10% приписываются MgSiO_3 . Почти такой же состав имеют ахондриты Нуево Ларедо, и Петербург (Дьюк и Силвер, 1967).

Ларсон и Финк не исключают присутствие на Весте небольших количеств оливинов, обедненных железом, и небольших количеств полевого шпата.

Позднее Л. Мак-Фаден и др. (1977) провели новые наблюдения Весты в видимой и близкой инфракрасной областях и уточнили положение и форму полосы поглоще-

ния около 0,9 мкм. По их оценкам нижний предел содержания неаблюдаемого оливина составляет 10%, а содержание Са в пироксенах может превышать 10%.

Спектры Весты, полученные в разное время (в частности, вблизи максимума и минимума блеска астероида), не обнаруживают сколько-нибудь значительных различий. Например, незаметно смещение полосы поглощения пироксена. Это показывает, что вещество, покрывающее Весту, весьма однородно по составу.

Спектральные исследования астероидов позволили уточнить и расширить классификацию астероидов (Цельнер и Боуэля, 1977). Умеренные альbedo и красноватые спектры S-астероидов приписаны веществу, которое содержит чистый металл и металлические ионы в силикатной решетке, причем полоса поглощения в близкой инфракрасной области указывает на наличие пироксена и/или оливина. Можно с уверенностью утверждать, что S-астероиды покрыты веществом, сходным с разными железокремниевыми метеоритами или с теми из обыкновенных хондритов, которые богаты железом.

Низкие альbedo и довольно пологие спектры C-астероидов почти наверняка обусловлены примесью углерода, а резкий спад спектра в ультрафиолетовой области означает присутствие ферросиликатов. C-астероиды, несомненно, являются родительскими телами по крайней мере части углистых метеоритов.

У M-астероидов альbedo сходно с альbedo S-астероидов, но спектры их более пологие с признаками присутствия свободного металла в значительных количествах.

Среди S-астероидов в особые классы выделены O-астероиды и E-астероиды. O-астероиды обладают высокими альbedo (до 0,26) и спектрами, сходными со спектрами хондритов, бедных металлом. E-астероиды обладают самыми высокими альbedo ($\geq 0,3$) и бесцветными спектрами, характерными для энстатитовых ахондритов, не содержащих металла.

Особое место заняли Троянцы, обладающие очень низким альbedo и необычными спектрами, и потому выделенные в особый класс T.

Небольшое количество объектов не удалось отнести ни к какому из перечисленных классов. Они получили обозначение U, что означает некласифицируемые (от

unclassifiable). К этим U-астероидам относятся некоторые крупнейшие астероиды, например, Веста с базальтовой поверхностью, Паллада, которую характеризует редкое сочетание оптических свойств, и даже Церера, являющаяся не совсем обычным C-астероидом.

Классификация астероидов по Б. Цельнеру и Э. Боуэлу (1971д) приведена в Приложении 3. Там же указаны размеры астероидов, их альbedo и точность определения этих величин (3 — наиболее уверенно) по Д. Моррису (1977в). Если объект исследован только методом *UBV*-фотометрии, то приведен размер, соответствующий, как говорилось выше, альbedo, модальному для данного класса.

М. Гаффей и Т. Мак-Корд (1977) указали семь типов минеральных ансамблей, характерных для веществ, слагающих поверхность тел, движущихся в кольце астероидов. Эти ансамбли и их аналоги, указанные с учетом содержания разных компонент, приведены в табл. 4. Некоторые из этих ансамблей практически совпадают с составом разных типов углистых метеоритов.

Однако несмотря на крайнее разнообразие спектров, а значит, и составов поверхностных слоев астероидов, в кольце астероидов практически не удалось найти аналогов наиболее распространенных типов метеоритов, а именно

Таблица 4

Ансамбли минералов астероидов кольца и их аналоги

№	Ансамбль астероидных минералов	Аналоги	Метеоритные аналоги
1	Непрозрачные минералы + силикаты, содержащие Fe^{2+} и Fe^{3+}	~ Углерод + минералы глины	~ C1, C2
2	Непрозрачные минералы + силикаты, содержащие Fe^{2+}	Углерод + оливины	~ C3
3	Обильные непрозрачные минералы + силикаты, содержащие Fe^{2+}	Магнетит + оливины	~ C4
3	Никелистое железо + пироксены		нет
5	Никелистое железо + оливины + пироксены		нет
6	Никелистое железо или Никелистое железо + энстатит		нет
7	Пироксены + полевой шпат		Eu

аналогов обыкновенных хондритов: вещество астероида класса S, как правило, содержит больше никелистого железа, чем обыкновенные хондриты.

Вместо этого, веществом, очень похожим на обыкновенные хондриты, оказались сложены мелкие астероиды из группы Аполлона и Амура. Высокое качество наблюдений некоторых из этих астероидов позволило пойти так далеко, чтобы идентифицировать ансамбли тинов H3, L и LL (см. ниже).

Что касается структуры поверхности астероидов, то представления о ней позволили получить поляризационные наблюдения. Т. Вайдорн (1967) показал, что поляризационная кривая несет информацию не только об альбедо. Диагностическими признаками физической природы поверхности, ее структуры, размеров зерен материала, слагающего поверхность и т. д., являются значение минимума на кривой поляризации U_{\min} и фазовый угол α_0 , при котором значение U становится равным нулю (см. рис. 36). Сопоставление U_{\min} и α_0 , полученных для астероидов, с данными лабораторных экспериментов показали, что аналогами астероидных поверхностей являются поверхности, сложенные обломками, припорошенными (загрязненными) мелкой пылью того же состава.

Поляризационные свойства астероидных поверхностей резко отличаются от свойств свежерасколотых и очищенных от пыли образцов горных пород, метеоритов и лунных камней. Не похожи они и на поляризационные свойства чрезвычайно рыхлой лунной пыли, между частицами которой луч света мечется, как в лабиринте, испытывая многократные отражения, дифракцию и рассеяние на отдельных пылинках.

Вообще говоря, поляризационные свойства астероидных поверхностей близки к свойствам земной пыли или пыли, полученной в лабораторных условиях путем измельчения силикатных камней разного происхождения (в том числе и лунных). Однако остается неясным, не будет ли эта пыль в условиях межпланетного вакуума вести себя так же, как лунная пыль, и не станет ли она столь же рыхлой.

Распределение объектов разных классов в кольце астероидов и его окрестностях. Как только было идентифицировано достаточно большое число астероидов, стало ясно, что в кольце астероидов астероиды разных классов

не перемешаны хаотично: S-астероиды тяготеют к внутренней зоне кольца астероидов, C-астероиды — к внешней.

На рис. 40 показана пространственная плотность астероидов крупнее 50 км в зависимости от гелиоцентрического расстояния отдельно для C- и S-объектов. Эта пространственная плотность, или концентрация объектов вычислена по данным Д. Моррисона (1977в) о числе объектов на орбитах с разными большими полуосями a . Значения a можно рассматривать как среднее гелиоцентрическое расстояние R объекта, и тогда, предполагая толщину кольца астероидов h постоянной, концентрацию астероидов можно грубо оценить, разделив указанное Моррисоном число объектов на $2\pi R \Delta R h$. Из рис. 40 видно, что концентрация S-астероидов имеет тенденцию убывать с ростом гелиоцентрического расстояния, тогда как концентрация C-астероидов, наоборот, возрастает и притом очень резко.

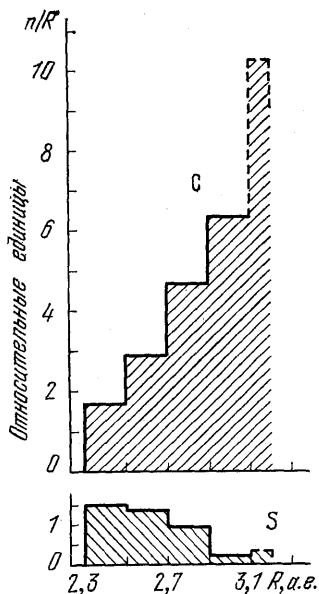


Рис. 40. Пространственная плотность тел с диаметром $D > 50$ км в кольце астероидов. (По данным Д. Моррисона, 1977в.)

Более поздние данные Б.Цельнера и Э. Боуэлла (1977д) подтверждают этот характер изменения концентрации объектов в зависимости от гелиоцентрического расстояния. Во внутренней зоне кольца астероидов, ближе к Солнцу, число C- и S-астероидов приблизительно одинаково. Во внешней зоне кольца движутся одни лишь C-астероиды.

Создается впечатление, что C- и S-астероиды представляют собой две независимые популяции объектов, образовавшихся на разных гелиоцентрических расстояниях (что объясняет их разную природу), и постепенно проникающие друг в друга под действием планетных возмуще-

лена по данным Д. Моррисона (1977в) о числе объектов на орбитах с разными большими полуосями a . Значения a можно рассматривать как среднее гелиоцентрическое расстояние R объекта, и тогда, предполагая толщину кольца астероидов h постоянной, концентрацию астероидов можно грубо оценить, разделив указанное Моррисоном число объектов на $2\pi R \Delta R h$. Из рис. 40 видно, что концентрация S-астероидов имеет тенденцию убывать с ростом гелиоцентрического расстояния, тогда как концентрация C-астероидов, наоборот, возрастает и притом очень резко.

ний. Времени существования кольца астероидов оказалось, очевидно, недостаточно, чтобы перемешать эти объекты.

M-астероиды тяготеют к центральной зоне кольца астероидов, но их выявлено слишком мало, чтобы обсуждать тенденцию их распределения.

К. Ченмен и др. (1975) указали, что S-астероиды избегают люков Кирквуда и встречаются вблизи них так же часто, как и вдали от них. Получалось, что люки Кирквуда существуют только в распределении S-астероидов. На эту особенность распределения астероидов обращали внимание и другие исследователи. Однако позже Б. Цельнер и Э. Боуэлл (1977д), имея в своем распоряжении более обширный материал, смогли проанализировать ситуацию более тщательно. Оказалось, что в действительности люки Кирквуда проявляются в распределении *крупных* объектов. Мелкие же объекты (≤ 80 км) не избегают люков. Иллюзия появления в люках S-астероидов, отмечавшаяся раньше, была связана с тем, что в рассматривавшейся популяции астероидов тогда присутствовали, как правило, крупные S-объекты и систематически более мелкие S-объекты.

Описанная ситуация приводит к мысли, что люки Кирквуда создавались долго и еще не успели очиститься от поздних продуктов дробления астероидов.

Важным результатом явилось то, что во внешней, далекой от Солица, зоне кольца астероидов, вопреки сложившимся представлениям, движется много крупных объектов размерами 100—200 км. Поскольку в этой зоне находятся лишь S-астероиды, их размеры в прошлом оказывались сильно заниженными.

Астероиды, движущиеся у внешней и внутренней окраин кольца астероидов (зоны А и В по Г. А. Чеботареву), как правило, обнаруживают систематические отличия от астероидов кольца. Но число изученных астероидов этих зон мало. Когда методом *UBV*-фотометрии было изучено пять астероидов группы Гильды (№№ 153, 334, 361, 1212 и 1268), то оказалось, что по цвету они не отличаются от S-астероидов кольца (Тейлор и др., 1976; Цельнер и др., 1977а). Позднее один из этих астероидов — (361) Бононю — удалось наблюдать поляриметрическим методом, и оказалось, что по своим поляриметрическим свой-

ствам он отличается от С-астероидов (Цельнер и Градье, 1978).

Несколько лучше изучены Троянцы. Они исследовались радиометрическим, поляриметрическим, спектральным методами, а также методом *UBV*-фотометрии (Крукшедк, 1977; Мак-Корд и Чепмен, 1975б; Цельнер и др., 1977а). Как уже упоминалось, это очень темные астероиды, в спектрах которых содержатся до сих пор не расшифрованные особенности. На них похожи по цвету внешние спутники Юпитера (Андерсон и др., 1977). В связи с этим Б. Цельнер и др. (1977а) полагают, что Троянцы образуют особую популяцию и что следует отказаться от прежнего мнения (см., например, Койпер, 1951), что Юпитер на время превращает в Троянцев или в свои спутники малые тела, захватываемые им из кольца астероидов.

Неожиданным оказалось, что по цвету на Троянцев похожа крупная Паллада, движущаяся в кольце астероидов. Обратив внимание на этот факт и на необычайно большой наклон орбиты Паллады, не характерный для астероидов кольца (§ 5), Ф. Уинпл и др. (1976) выдвинули гипотезу, что Паллада — это бывший Троянец, ускользнувший из-под влияния Юпитера. Этому не противоречит то, что среди Троянцев много крупных объектов (см. Приложение 3), движущихся по орбитам, сильно наклоненным к эклиптике.

Изучено немногим более 10 астероидов, движущихся у внутренней, ближайшей к Солнцу окраины кольца астероидов (Цельнер и др., 1977а и др.). Это мелкие астероиды из групп Аноллона и Амура. Большая часть таких изученных астероидов идентифицирована как объекты класса S или O (см. также § 10).

Большинство исследователей придерживается мнения, что систематические различия физических свойств астероидов, движущихся на разных гелиоцентрических расстояниях, отражают разные условия, существовавшие в протопланетном облаке в эпоху формирования астероидов. Представляется естественным, что эти условия (прежде всего температура и давление) на том интервале гелиоцентрических расстояний, которое занимает кольцо астероидов, были действительно различными.

Суммарный объем астероидов. Общая масса астероидного вещества, Проще всего оценить суммарный объем

астероидов, просуммировав объемы отдельных астероидов. Подсчеты суммарного объема астероидов и общей массы астероидного вещества стали производить сразу же после того, как Э. Барнард измерил крупнейшие астероиды. Размеры остальных астероидов определялись при этом, как уже говорилось, на основании среднего альбеда. Уже в 1901 г. И. Баушингер и П. Нойгебауер подсчитали объем и массу 458 известных тогда астероидов. Такие подсчеты, в которые включались всё новые открываемые астероиды, повторялись неоднократно (см. Шубарт, 1971). Наконец, Д. Моррисон (1977в) получил возможность уточнить эти оценки, воспользовавшись радиометрическими и поляриметрическими данными для 200 астероидов. По данным Моррисона суммарный объем 13 крупнейших астероидов размерами > 250 км (без Цереры) составляет $4 \cdot 10^{23}$ см³, для астероидов размерами от 250 до 70 км Моррисон получил объем $3,7 \cdot 10^{23}$ см³, а экстраполируя до астероидов размерами вплоть до 20 км на основании распределения по звездным величинам, полученного по Паломар-Лейденскому обзору, он получил дополнительный объем $\sim 2,7 \cdot 10^{23}$ см³. Предположив, что средняя плотность астероидного вещества равна 3 г/см³, Моррисон получил общие массы астероидов указанных размеров $1,2 \cdot 10^{24}$, $1,1 \cdot 10^{24}$ и $\sim 0,8 \cdot 10^{24}$ г соответственно. Это давало для астероидов с диаметрами $700 > D > 20$ км (без Цереры), движущихся в кольце астероидов по орбитам с $2,0 < a < 3,5$ а.е., суммарный объем 10^{24} см³ и общую массу $3 \cdot 10^{24}$ г, а вместе с Церерой — объем $1,5 \cdot 10^{24}$ см³ и массу $4,2 \cdot 10^{24}$ г (если пользоваться оценкой массы по Шубарту).

Учесть более мелкие астероиды, вплоть до тел километровых размеров, о числе которых сведений практически нет, можно, предполагая, что их распределение по массе (или по размерам) подчиняется тому же закону, что и для более крупных тел. Этот закон обычно аппроксимируется степенным законом вида $N(M) \sim M^{-S}$, причем $S < 2$ (что означает, что основная масса сосредоточена в крупных телах). При $S = 1,75$ учет мелких астероидов увеличивает приведенные выше оценки суммарного объема и общей массы астероидов всего на несколько процентов.

Еще меньшую добавку дает учет глыб, камней и пыли, образующихся при дроблении астероидов во взаимных столкновениях. Следует сказать, что пыли и мелких кам-

пей в кольце астероидов, по-видимому, меньше, чем за его пределами. Дело в том, что кольцо астероидов непрерывно очищается от пыли и камней в результате действия эффектов Пойнтинга — Робертсона и Ярковского — Радзиевского. Действие первого эффекта проявляется в движении наиболее мелких, прогреваемых Солнцем насквозь пылевых частиц. Такие частицы поглощают солнечную энергию лишь освещенной Солнцем поверхностью, а переизлучают ее изотропно как освещенной, так и теневой поверхностью. В результате у частицы, движущейся вокруг Солнца, возникает тормозящая сила, ведущая к сокращению орбиты частицы, так что частицы медленно «спиралят» к Солнцу, покидая кольцо астероидов. Частицы миллиметровых размеров уходят из него через несколько десятков миллионов лет, а частицы сантиметровых размеров — через несколько сотен миллионов лет.

Эффект Ярковского — Радзиевского может проявляться в движении крупных камней и обломков, вращающихся вокруг своей оси. Крупные тела переизлучают солнечную энергию анизотропно, как и поглощают ее. Но из-за вращения «теплая» поверхность оказывается всегда несколько смещена в направлении вращения по отношению к освещенной поверхности, так что возникает сила, в зависимости от направления вращения либо тормозящая, либо ускоряющая движение тела по орбите. Если направление вращения остается неизменным длительное время, то размеры орбит сокращаются или увеличиваются, и тела размерами даже в метры или десятки метров могут покидать кольцо астероидов через довольно короткое время после своего образования — спустя десятки и сотни миллионов лет.

На основании сказанного приведенные выше оценки суммарного объема и общей массы астероидов можно рассматривать как относящиеся к объему и массе всего астероидного вещества в кольце астероидов. Эти оценки существенно превышают прежние, что объясняется недооценкой в прошлом размеров С-астероидов. Однако заметим, что Моррисон при определении массы астероидов воспользовался, по-видимому, несколько завышенной средней плотностью астероидного вещества: большая часть С-астероидов сложена, вероятно, веществом, сходным с веществом углистых метеоритов типа С1 и С2, имеющих плот-

ность 2,2—2,3 и 2,6—2,9 г/см³ соответственно (Кринов, 1955). Это косвенно подтверждается тем, что для Цереры радиометрический диаметр по Моррисону и масса по Шубарту приводят к среднему значению плотности как раз в 2,27 г/см³, и нет никакого основания предполагать большую плотность для других, но крайней мере крупных С-астероидов.

Впрочем, правильный выбор плотности астероидов разных классов и уточнение закона распределения астероидов по массе (и размерам) не может изменить приведенные оценки более, чем в два раза.

На основании распределения астероидов по абсолютным звездным величинам неоднократно демонстрировалось, что основная масса астероидного вещества сосредоточена в крупных астероидах и в астероидах средних размеров. Мелкие тела, хотя и многочисленны, дают малую добавку к общей массе (Путилиц, 1953; Шубарт, 1971).

Другой путь определения массы астероидного вещества основан на анализе возмущений, которые оказывает кольцо астероидов на движение отдельных астероидов или, например, Марса. Первые попытки оценить массу астероидного вещества таким способом делались еще в 1910 г. А. Брунном, который показал, однако, что в то время не было возможности выявить гравитационное влияние кольца астероидов. В последние годы И. Шубарт (1971) показал, что хотя паконлепы большие ряды хороших наблюдений положений крупнейших астероидов, по-видимому, достаточные, чтобы выявить влияние на них суммарных возмущений остальных астероидов, для определения суммарной возмущающей массы все еще необходимо построение более строгой теории движения этих астероидов, в частности, необходим учет тесных сближений их с другими астероидами. Что касается возмущений, испытываемых со стороны кольца астероидов Марсом, то обнаружить их не удастся, и это дает верхний предел суммарной массы астероидного вещества $\sim 10^{24}$ г, что вполне согласуется с оценкой Моррисона, приведенной выше.

Итак, в астероидах сосредоточена масса, составляющая около 1/20 массы Луны, или 1/1500 массы Земли. Даже собранные все вместе астероиды образовали бы тело размерами всего в 1400 км. Это, конечно, слишком мало, чтобы подобное тело пазывалось большой планетой и

смогло заполнить брешь между Марсом и Юпитером. Это лишний раз показывает несостоятельность мифа о Фаэтоне — большой планете, якобы двигавшейся некогда на месте кольца астероидов. Было ли в соответствующей области протопланетного облака достаточно много вещества для формирования большой планеты и какой механизм ответствен за рассеяние этого вещества — это вопросы, которые продолжают обсуждаться и еще ждут своего решения.

Форма и вращение астероидов. Астероиды так малы, что сила тяжести на них не в состоянии придать им форму шара, какую она придает планетам и их большим спутникам, сминая и «утрамбовывая» вещество, из которого они состоят. Большую роль при этом играет явление текучести, которое возникает, когда нагрузка, создаваемая в рассматриваемом случае силой тяжести, достигает критической величины S . Для большинства горных пород $S \geq 10^9 \text{ г/см} \cdot \text{сек}^2$.

Обозначим через $h_{\text{кр}}$ высоту столба единичного сечения, масса которого численно равна S . Тогда можем записать

$$\delta \bar{g} h_{\text{кр}} = S,$$

где δ — плотность вещества, \bar{g} — среднее значение ускорение силы тяжести.

На Земле $g = 980 \text{ см/сек}^2$. При $\delta = 3,5 \text{ г/см}^3$ получим $h_{\text{кр}} \approx 3 \text{ км}$. Это значит, что высокие горы у подошвы «расползаются», так как прочность камня оказывается недостаточной, чтобы выдержать нагрузки во многие тонны на 1 см^2 , и камень, сжатый со всех сторон, не дробясь, не раскалываясь, течет, хотя и очень медленно.

На астероидах поперечником даже в 300—400 км из-за малого «веса» камня подобное явление текучести вовсе отсутствует, а на самых крупных астероидах оно происходит чрезвычайно медленно, да и то лишь в их недрах. В самом деле, ускорение силы тяжести на поверхности астероида массой M и радиусом ρ может быть записано как

$$g = \frac{GM}{\rho^2},$$

или

$$g = \frac{4}{3} \pi G \delta \rho,$$

где G — постоянная тяготения.

Внутри тела однородной плотности ускорение силы тяжести меняется линейно вдоль радиуса, падая в центре до нуля. Поэтому, рассматривая давление столба высотой $h = \rho$ в центре астероида, следует принять $\bar{g} = 0,5g$. Подставляя выражение для \bar{g} в (4) и решая полученное уравнение относительно $h_{кр}$, получим выражение для критического радиуса астероида $\rho_{кр}$ (равного $h_{кр}$), в центре которого возникает явление текучести,

$$\rho_{кр} = 2,67 \cdot 10^3 \frac{S^{1/2}}{\delta} \text{ (СГС).}$$

Отсюда получаем, что у S-астероидов ($\delta \approx 3,5 \text{ г/см}^3$) $\rho_{кр} = 240 \text{ км}$, а у C-астероидов ($\delta \approx 2 \text{ г/см}^3$) $\rho_{кр} = 420 \text{ км}$. Таким образом, «утрамбованы» силой тяжести могут быть лишь недра немногих крупнейших астероидов. Если вещество астероида не прошло стадию плавления, то оно, по всей вероятности, осталось «плохо унакованным», т. е. таким, каким возникло на стадии аккумуляции.

На основании подобных несложных рассуждений следует ожидать, что астероиды (за исключением нескольких самых крупных) должны иметь неправильную обломочную форму, если только они действительно представляют собой продукты дробления более крупных тел. Обломочная форма, возникшая у астероида при дроблении, не подвергается в дальнейшем выравниванию под действием силы тяжести. Кратеры, возникшие на поверхности даже крупнейших астероидов при столкновении с мелкими телами (§ 9) «не занываются» с течением времени, как «заплывают» крупные метеоритные кратеры на Земле. Они сохраняются до тех пор, пока не будут уничтожены при последующих ударах об астероид новых тел. Поэтому горы на астероидах гораздо выше, а впадины гораздо глубже, чем на Земле и других планетах: среднее отклонение от уровня сглаженной поверхности на крупных астероидах составляет 10 км и более, о чем свидетельствуют радиолокационные наблюдения астероидов.

Неправильная форма астероидов подтверждается и тем, что их блеск необычайно быстро падает с ростом фазового угла. У Луны и Меркурия аналогичное уменьшение блеска вполне объясняется только уменьшением видимой с Земли доли освещенной Солнцем поверхности: тени от гор и впадин оказывают слабое влияние на общий блеск.

Иначе обстоит дело с астероидами. Одним лишь изменением освещенной Солнцем доли поверхности астероида столь быстрые изменения их блеска объяснить нельзя. Основная причина (особенно у астероидов малых размеров) такого характера изменения блеска заключается в неправильной форме астероидов, из-за которой одни участки поверхности на освещенной Солнцем стороне экранируются от солнечных лучей другими.

У одного астероида, а именно у (433) Эроса, неправильная форма наблюдалась непосредственно в телескоп еще в 1931 г., когда этот астероид подошел к Земле на малое расстояние (28 млн. км). Он был виден в телескоп как «гантель», или неразрешенная двойная звезда с расстоянием между компонентами около $0'',18$. Было заметно даже, что эта «гантель» вращается вокруг своей оси.

В январе 1975 г. Эрос подошел к Земле на 26 млн. км. Его наблюдали на большом отрезке орбиты, так что фазовый угол в течение этого времени менялся от 9 до 44° . Анализ многочисленных наблюдений, проводившихся на обсерваториях всего мира, привел к интересным выводам.

Блеск Эроса менялся на $1^m,5$ (почти в четыре раза) с периодом в 2 ч. 38 м. (рис. 41). Предполагали, что эти

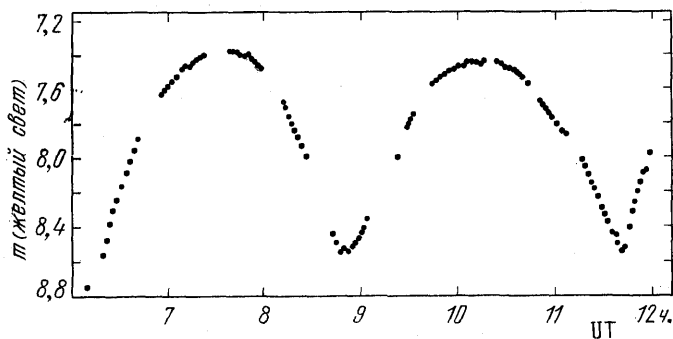


Рис. 41. Изменение блеска Эроса 12 января 1975 г.

изменения блеска обусловлены изменением видимого с Земли сечения вращающегося гантелеобразного астероида и что именно в четыре раза отличаются его максимальное и минимальное сечения. В этом случае минимум

блеска астероида должен был бы наблюдаться в тот момент, когда Эрос обращен к нам своим острым концом.

На деле все оказалось сложнее. Во-первых, вопреки ожиданиям, последовательные максимумы и минимумы блеска имели разную амплитуду. К этому времени опыт, накопленный по лабораторному моделированию формы астероидов (Герелс, 1971), показал, что различие соседних максимумов и минимумов может быть связано только с крайне неправильной формой астероида. Анализ наблюдений Эроса с дополнительным лабораторным моделированием его формы показал, что большое влияние на блеск астероида оказывает игра света и тени на его поверхности. В результате минимум блеска Эроса в действительности наблюдался как раз тогда, когда астероид был обращен к Земле почти максимальным своим сечением. Период вращения Эроса оказался равным двум периодам колебаний блеска, т. е. 5 ч. 16 м. Выяснилось, что этот астероид представляет собой удлиненное тело с соотношением длины к толщине приблизительно 1 : 2,5, а его линейные размеры $\sim 10 \times 25$ км. Эрос вращается вокруг короткой оси, которая почти лежит в плоскости орбиты астероида. Северный полюс Эроса направлен в точку с координатами $\alpha = 0^h 40^m$ и $\delta = +16^\circ$. Направление вращения прямое.

Амплитуда изменений блеска Эроса меняется в зависимости от того, как по отношению к Земле ориентирована его ось вращения. Когда она оказывается паправленной по лучу зрения наблюдателя, колебания блеска прекращаются.

Колебания блеска, обусловленные вращением, наблюдаются у многих астероидов. Они редко бывают значительны. У (39) Летиции была зарегистрирована амплитуда, достигающая $0^m,54$, у (44) Низы — $0^m,46$, у (15) Эвномии — $0^m,49$.

Одно время казалось, что основной причиной переменности блеска, по крайней мере у большей части крупных астероидов, является их пятнистость, т. е. неоднородность альбеда разных участков поверхности. Однако пятнистость должна была бы давать кривую блеска, медленно и монотонно изменяющуюся с течением времени из-за того, что мепяется по отношению к земному наблю-

дателю положение оси вращения. Но соседние максимумы и минимумы блеска по форме и амплитуде не должны были отличаться сколько-нибудь заметно. И вот, когда стало возможным вести регистрацию блеска астероидов с помощью чувствительной электронно-оптической аппаратуры, то оказалось, что соседние максимумы и минимумы кривой блеска различны. Повторяющимися оказались пары максимумов и минимумов. Как и в случае Эроса, это интерпретируется как результат вращения тел неправильной формы, дающих из-за игры света и тени на поверхности два максимума и два минимума блеска за один оборот астероида вокруг своей оси. Спектральные наблюдения подтверждают, что в максимуме и минимуме блеска не обнаруживается различий в отражательных свойствах астероидной поверхности, которые появились бы, будь разные участки поверхности сложены различным веществом или имели они разные альбедо.

Неправильной формой обладает даже один из крупнейших астероидов — Веста. Спектральные наблюдения Х. Ларсона и У. Финка (1975), наблюдения методом *UBV*-фотометрии и поляриметрические наблюдения Б. Цельнера и др. (1977 г.; Цельнер и Градье, 1976) показали, что поверхность Весты обладает одинаковым цветом и альбедо. Но еще в 1971 г. Р. Тейлор (1973) на основании фотоэлектрической фотометрии обнаружил, что и у Весты соседние максимумы и минимумы блеска различаются по амплитуде и по форме. Тейлор предположил, что это обусловлено неправильной формой астероида и что вращение его происходит не с периодом колебаний блеска, а с периодом вдвое большим — 10 ч. 40 м. Анализ особенностей кривой блеска привел Тейлора к выводу, что Веста представляет собой трехосный сфероид, один диаметр которого на 15% длиннее двух других (ср. с изображением Весты на рис. 35). Вдоль длинной стороны сфероида должна тянуться уплощенная область, простирающаяся от южного полюса Весты до 45° ю.ш. Тейлор полагает, что это может быть огромный кратер ударного происхождения (диаметром почти в 400 км).

Выводам Тейлора не противоречит существование семейства Весты с множеством мелких астероидов километровых размеров (см. рис. 26), которые могли быть выброшены из этого гигантского кратера.

Период изменений блеска астероидов короткий. Его значения заключены в интервале от 2—3 до 10—15 ч. Если изменения блеска во всех случаях объясняются неправильной формой тел, то период их вращения, очевидно, составляет от 4—6 до 20—30 ч.

Приобрести вращение астероиды могли в момент своего образования: мелкие при дроблении более крупных, а крупные — еще при их аккумуляции. В этом случае следовало бы ожидать, что все крупные астероиды вращаются в прямом направлении. Но определить направление их вращения трудно и это пока удалось лишь для нескольких из них.

Один из методов определения направления вращения астероида состоит в сравнении периодов колебаний его блеска при поступательном движении астероида (движение среди звезд по небу навстречу суточному движению небесного свода) и при попятном его движении (в противоположном направлении). При вращении в прямом направлении синодический период этого вращения (который и определяет периоды колебаний блеска) окажется длиннее при поступательном движении астероида, чем при попятном. Р. Тейлору (1973) удалось этим методом определить направление вращения Весты, которое оказалось прямым.

К сожалению, кривые блеска астероидов имеют, как правило, малую амплитуду и к тому же содержат много неправильностей. Это обычно не позволяет определить период колебаний блеска астероида с необходимой точностью.

Другой метод основан на радиометрических наблюдениях астероида до и после оппозиции (Моррисон, 1977в). Дело в том, что даже если астероид вращается медленно и вещество, слагающее его поверхность, имеет малую теплопроводность, температуры поверхности в каждой точке слегка отличаются от равновесных, а в распределении температур относительно подсолнечной точки возникает легкая асимметрия. Это вызывает ошибку порядка 5% в определении диаметра астероида радиометрическим методом. Но эта ошибка имеет разные знаки при наблюдениях астероида до и после оппозиции. В самом деле, предположим, что астероид вращается в прямом направлении. Тогда до оппозиции (при отрицательных углах фазы) к земному наблюдателю обращена прогретая и

потому более теплая вечерняя сторона астероида. Это приведет к завышению радиометрического диаметра. После оппозиции будет наблюдаться более холодная утренняя сторона, что приведет к занижению диаметра. При обратном направлении вращения картина изменится на противоположную.

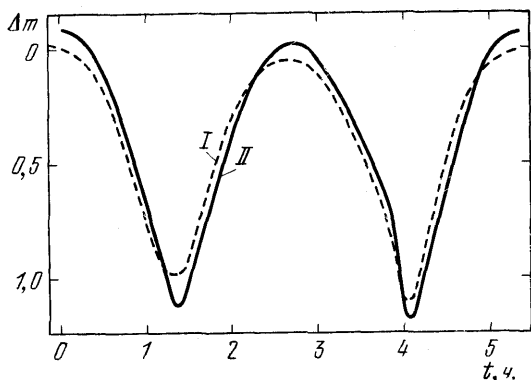


Рис. 42. Изменение блеска Эроса в отраженном свете на длине волны $1,25 \text{ мкм}$ (I) и изменение теплового излучения на длине волны $11,6 \text{ мкм}$ (II). Кривая II имеет большую амплитуду и немного запаздывает из-за вращения астероида.

Используя различие радиометрических диаметров по наблюдениям до и после оппозиции, О. Хансен (1977в) и другие исследователи показали, что Церера вращается в прямом направлении. Весьма вероятно прямое вращение у Паллады, Весты и (19) Фортуны. Для (10) Гигии получается как будто обратное вращение, а для (9) Метиды установить направление вращения не удастся, так как получены практически одинаковые значения диаметра и до и после оппозиции.

Перспективными могут оказаться синхронные наблюдения астероидов в видимом и инфракрасном диапазонах. Если получены кривые блеска астероида в видимом и инфракрасном диапазонах, то запаздывание инфракрасной кривой блеска означает, что мы наблюдаем более холодную утреннюю сторону. При наблюдениях после оппозиции это означает прямое вращение астероида. Так

было определено прямое направление вращения Эроса (рис. 42).

Температура поверхности астероидов. Астероиды — холодные тела. Температура их поверхности определяется инсоляцией. Даже в прошлом, когда недра астероидов были теплыми или горячими (§ 8), поток тепла из недр был неощутимо мал, так что поверхностные слои оставались холодными и тогда.

Равновесную температуру поверхности астероида в любой точке можно определить, приравнявая поглощаемую элементом поверхности солнечную энергию и теряемую этим же элементом тепловую энергию (см., например, Мартышов, 1979). Поступив таким образом, получим, что у С-астероидов на расстоянии $R = 2,76$ а.е. от Солнца (среднее расстояние Цереры) максимальная температура (в подсолнечной точке) $T_{\max} = 170$ °К, а на расстоянии $R = 5,2$ а.е. от Солнца (среднее расстояние Троянцев) $T_{\max} = 125$ °К (рис. 43). У S-астероидов температура из-за большего альбеда и меньшей доли поглощаемой энергии солнечного излучения на $\sim 10\%$ ниже, чем у С-астероидов на тех же гелиоцентрических расстояниях, а у таких светлых астероидов, как Веста, — на $\sim 20\%$ ниже.

Усредняя температуру по всей освещенной поверхности, получим, что у астероидов сферической формы средняя температура освещенной Солнцем поверхности \bar{T} в $2^{1/4} = 1,2$ раза ниже температуры в подсолнечной точке.

Недавно Церера была добавлена к списку объектов Солнечной системы, которые можно изучать с помощью радиотелескопов. Ф. Бриггс в 1976 г. на обсерватории в Грин Бэнк, США, измерил радиоизлучение Цереры на длине волны 3,7 см. Как и следовало ожидать, Церера оказалась очень слабым радиоисточником с потоком

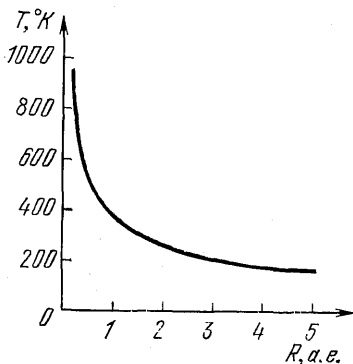


Рис. 43. Температура в подсолнечной точке С-астероидов на разных гелиоцентрических расстояниях.

0,0024 *ян* *). В предположении, что радиоизлучение Цереры представляет собой «хвост» теплового излучения, Бриггс по радиояркости оценил температуру Цереры, приняв ее диаметр равным 1025 км, и получил значение $\bar{T} = 160 \pm 55$ °К. Это определение находится в хорошем согласии с теоретической оценкой, за которую следует принять (поскольку наблюдения проводились вблизи оппозиции) среднюю температуру освещенной полусферы, или $0,84 T_{\max} = 143$ °К.

Из-за вращения астероидов температура их поверхности быстро меняется. Согретые Солнцем участки поверхности из-за низкой теплоемкости и малой теплопроводности слагающего их вещества быстро остывают. В результате по поверхности астероида бежит суточная тепловая волна, которая быстро затухает с глубиной: она не проникает на глубину даже в несколько десятков сантиметров, и там температура вещества оказывается практически постоянной (такой же, как в недрах астероида) — на несколько десятков градусов ниже средней температуры освещенной Солнцем поверхности астероида. У тел, движущихся в кольце астероидов, ее грубо можно принять 100—150 °К.

Максимум теплового излучения астероидов лежит в области длин волн, определяемой законом смещения Вина $\lambda_{\max} = \frac{C}{T}$, где $C = 0,290$ см·град — постоянная Вина. Для тел в кольце астероидов, приняв $T \approx 150$ °К, получаем $\lambda_{\max} \approx 20$ мкм. Так как астероиды не обладают атмосферами (которые они и не смогли бы удержать), следует ожидать, что их инфракрасные спектры выглядят как непрерывное излучение с интенсивностью, монотонно убывающей по мере удаления от λ_{\max} . Этот характер спектров был подтвержден наблюдениями астероидов (10) Гигии, (39) Летиции и (40) Гармонии, проведенными в инфракрасной области 8—20 мкм с применением узкополосных фильтров (Хансен, 1974). Но температуры, оценен-

*) В астрофизике интенсивность излучения космических радиоисточников принято выражать в единицах плотности потока излучения. За такую единицу принята величина 10^{-23} вт/м²·гц, которая теперь по рекомендации Международного Астрономического союза называется «янски» — в честь американского радиоинженера К. Янского (1905—1950), обнаружившего в 1931—1932 гг. радиоизлучение Млечного Пути.

ные О. Хансеном на основании этих наблюдений, оказались по неясной причине выше расчетных ($\sim 240^\circ\text{K}$).

Во время тех же наблюдений в инфракрасной области О. Хансен обнаружил на спектральной кривой Цереры в области $12\ \mu\text{м}$ «всплеск» излучения (на $0^m,5$). Аналогичные «всплески» Хансен (1973) наблюдал в спектрах галлеевых спутников Юпитера и объяснял их излучением молекулярных соединений в атмосферах этих тел. Поскольку Церера по размерам значительно меньше их и не может удерживать атмосферу, Хансен предположил, что из ее недр происходит непрерывное истечение летучих веществ.

Низкая температура тел, движущихся в кольце астероидов, означает, что диффузия в астероидном веществе заморожена. Инсоляция способна вызвать к жизни диффузию только у тех астероидов, которые движутся по орбитам с малыми перигелийными расстояниями (и благодаря этому сильно приближаются к Солнцу), но лишь в приповерхностных слоях и лишь на очень короткое время. Следы такой диффузии, несомненно, несет в себе приповерхностное вещество астероида (1566) Икар, нагревающееся во время пребывания астероида в перигелии орбиты ($q = 0,186\ \text{а. е.}$) до $\sim 1000^\circ\text{K}$ (см. рис. 43).

Что касается мелких астероидных обломков на орбитах с малыми перигелийными расстояниями, то они, несомненно, могут периодически прогреваться до температур размораживания диффузии. Следы такого слабого кратковременного, но неоднократно повторяющегося нагрева могут присутствовать в некоторых метеоритах. Подобному нагреву могли подвергаться метеориты Вашугал и Старое Песьяное, двигавшиеся по орбитам, для которых не исключены значения $0,4 > q > 0,1\ \text{а. е.}$ и $0,5 > q > 0,2\ \text{а. е.}$ соответственно (Симоненко, 1975). Такой нагрев может объяснить аномально короткие, как бы слегка отоженные треки от космических лучей в метеорите Марьялахти.

Г л а в а III

РОДИТЕЛЬСКИЕ ТЕЛА МЕТЕОРИТОВ

Иерархия родительских тел метеоритов. Подавляющее большинство обломков, выпадающих на Землю в виде метеоритов, образовалось в результате многократного дробления крупных астероидов в десятки и сотни километров. Поэтому почти у каждого метеорита было несколько родительских тел, точнее, — иерархия родительских тел все убывающих размеров, в которой Б. Ю. Левин (1977; Левин и Симопенко, 1977) предложил различать (рис. 44):

1) первичное родительское тело, в горячих или по крайней мере теплых недрах которого метеоритное вещество приобрело основные черты химического и минералогического состава и структуры;

2) промежуточные родительские тела, которых могло быть несколько. В слое реголита на поверхности промежуточных тел многие метеориты приобрели свою брекчиевую структуру;

3) последнее родительское тело размерами в несколько метров или крупнее, внутри которого метеоритное вещество оставалось защищенным от галактических космических лучей.

Первичные родительские тела многих метеоритов, выпадающих ныне на Землю, вероятно, уже не существуют: чтобы породить промежуточные родительские тела, на поверхности которых оказалось обнажено вещество, находившееся ранее в подогретых, сравнительно глубоких недрах первичных тел, последние должны были претерпеть полное разрушение.

Лишь у углистых и немногих других метеоритов, которые могут быть обломками внешних слоев первичных родительских тел, возможно, еще сохранились их первич-

ные родительские тела, хотя не исключено, что первичными родительскими телами углистых метеоритов были и небольшие астероиды, которые вследствие своей малости никогда не разогревались.

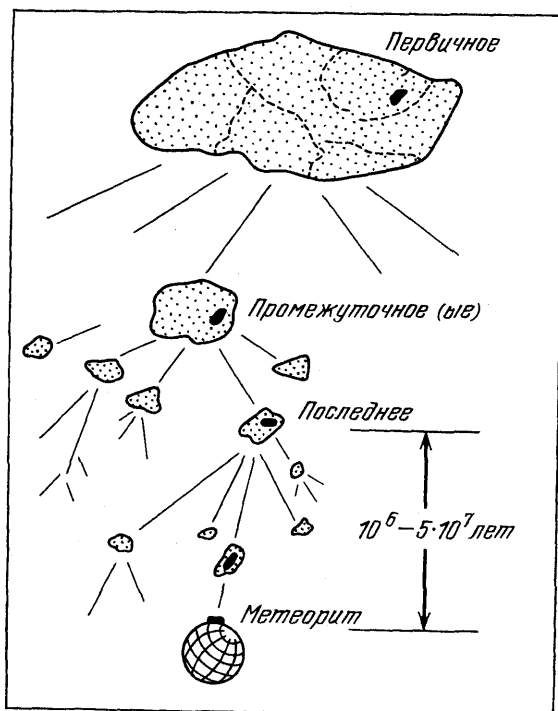


Рис. 44. Три основных поколения в иерархии родительских тел метеоритов. (По Б. Ю. Левину, 1977.)

Для промежуточных и последних родительских тел возможны как полное, так и частичное разрушение в ходе столкновений с другими астероидами или их обломками. Поскольку последовательность дроблений промежуточных родительских тел представляет собой ветвящийся процесс, и ныне должно существовать много обломков (т. е. астероидов средних и малых размеров, возникших в результате дробления более крупных), подобных тем, которые уже исчезли в результате полного разрушения,

или были вычернаны планетами, или оказались выброшены за пределы планетной системы. Некоторые из этих сохранившихся тел являются промежуточными или последними родительскими телами тех метеоритов, которые в отдаленном будущем еще высадут на Землю.

§ 8. Первичные родительские тела метеоритов

Термическая история метеоритов. Размеры их родительских тел. Огромную роль в понимании того, какой была термическая история метеоритов и какие астероиды могли быть их первичными родительскими телами, сыграл анализ структуры железных метеоритов, а затем структуры железной фазы метеоритов и других классов.

Как уже говорилось (§ 2), подавляющее большинство железных метеоритов представляет собой прорастающие друг в друга четыре системы плоскостепенных пластин камасита, разделенных тэнитом, а часто и плесситом. Эти системы редко оказываются нарушенными. Обычно они пронизывают весь метеорит (рис. 45). Только в очень крупных метеоритах удастся различить несколько отдельных областей размерами в десятки сантиметров с независимыми системами камаситовых пластин.

Дж. Юнг (1926) и Г. В. Курдюмов (1933; Курдюмов и Закс, 1930) первые попытались объяснить формирование подобных структур процессами фазовых превращений в монокристаллах железа, остывающего от высоких температур. В дальнейшем это представление было развито на основании результатов, достигнутых в физике и металлургии.

В настоящее время оно является общепризнанным, и мы остановимся на нем подробнее. Железо, как и многие другие кристаллические вещества, в твердом состоянии может существовать в разных модификациях, или фазах, характеризующихся разным расположением атомов в их кристаллических решетках. При температуре ниже 910°C кристаллы чистого железа построены из кубических объемно-центрированных ячеек (рис. 46, I). Это α -фаза железа. Пока температура не достигла 910°C , межатомные расстояния при нагревании кристалла железа медленно растут. Одновременно возрастают тепловые коле-

бания атомов. Энергия связей между атомами ослабевает как по абсолютному значению, так и по отношению к возрастающей энергии тепловых колебаний. При $t = 910^\circ\text{C}$ эти связи становятся уже недостаточными для сохранения



Рис. 45. Полированная и протравленная поверхность распила одного из образцов железного метеорита Нечаево. Видны видманштеттеновы фигуры. Стрелками показаны силикатные включения. (По Ф. Бухвальду, 1967).

кристаллической решетки. Но аморфизации вещества не происходит. Вместо разрыва межатомных связей происходит их замена системой новых связей — более коротких и потому более прочных, способных противостоять более высокой температуре. У железа по этой причине объемноцентрированная кристаллическая решетка преобразуется в гранецентрированную (рис. 46, I), давая γ -фазу.

Перестройка атомов в решетке при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении идет так, чтобы энергетические затраты на перемещение атомов оказались наименьшими. Это достигается, когда кристаллографическая плоскость (110) α -фазы становится кристаллографической плоскостью (111) γ -фазы. Поэтому превращение развивается вдоль этой плоскости (рис. 46, II).

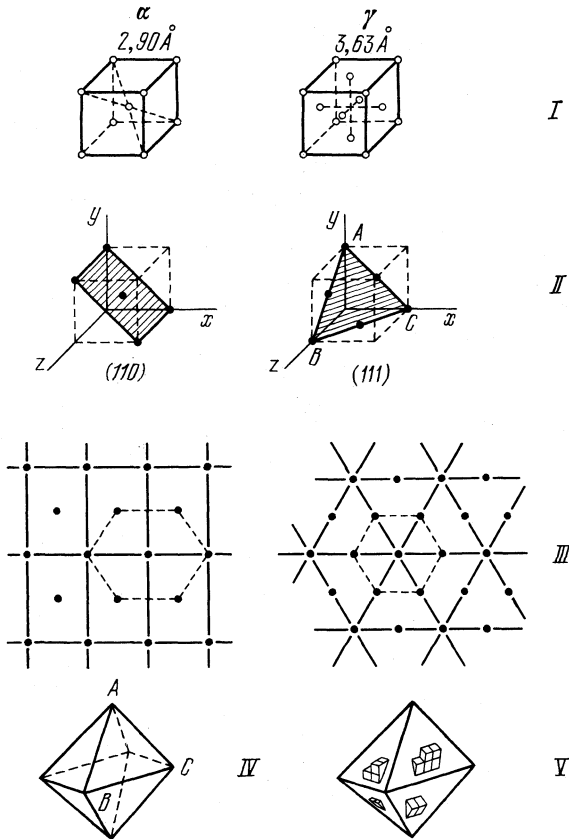


Рис. 46. I — объемно-центрированная кубическая ячейка кристалла α -фазы железа (слева) и гранецентрированная кубическая ячейка γ -фазы (справа); II — расположение кристаллографических плоскостей (110) и (111) в кристалле α -фазы и γ -фазы соответственно; III — расположение атомов кристаллической решетки в этих плоскостях; сплошными линиями показаны границы ячеек. Штриховой линией показаны эквивалентные группы α - и γ -фаз, взаимно перестраивающиеся при фазовом превращении. IV — октаэдр, образованный плоскостью (111) и ей эквивалентными в кристалле γ -фазы. V — рост ячеек α -фазы вдоль граней этого октаэдра.

Примеси в кристаллической решетке (в частности, атомов никеля, которые замещают атомы железа в узлах решетки) нарушают регулярность межатомных сил и ослабляют решетку. Поэтому необходимость упрочнения связей, т. е. превращения α -фазы в γ -фазу, возникает при

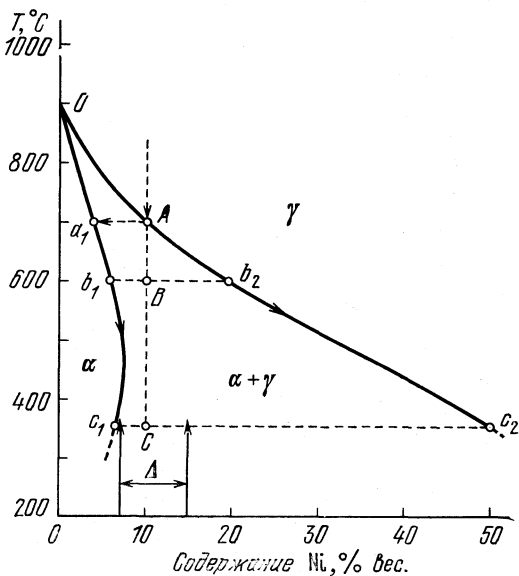


Рис. 47. Диаграмма состояния никелистого железа. Показан пример $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения для никелистого железа с содержанием никеля 10% вес. Точка A соответствует началу превращения, точка C — окончанию этого процесса при замораживании диффузии. Δ — интервал содержания никеля в большинстве железных метеоритов.

более низкой температуре, чем у чистого железа. Температура превращения оказывается тем ниже, чем больше примесь никеля.

Теперь рассмотрим в общих чертах процесс формирования октаэдритовой структуры железных метеоритов, помня, что процесс превращения фаз является обратимым. Воспользуемся для этого широко известной диаграммой состояния никелистого железа, приведенной на рис. 47. Две кривые на диаграмме ограничивают области существования γ - и α -фазы, которые в метеоритике назы-

ваются *тэнитом* и *камаситом* соответственно. Между ними находится область, в которой возможно совместное существование обеих фаз, причем равновесная концентрация никеля в этой области в γ - и α -фазе определяется для каждой температуры соответствующими ей точками на кривых.

Из диаграммы видно, что при высоких температурах никелистое железо находится в γ -фазе. Для типичных средних концентраций никеля в железных метеоритах (7—14% вес.) $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение начинается при $t = 650\text{—}750^\circ\text{C}$.

На диаграмме показан пример $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в метеоритном никелистом железе с концентрацией никеля 10% вес. Превращение начинается при $t \approx 700^\circ\text{C}$. В γ -фазе (т. е. тэните) появляются поначалу небольшие области α -фазы (т. е. камасита) с концентрацией никеля около 4% вес. При падении температуры области камасита растут.

Камасит появляется в виде тонких листков, или пластинок, ориентированных вдоль плоскостей (111). Расположение атомов в этих плоскостях и характер перестройки атомов при превращении иллюстрирует рис. 46, III. В гранецентрированной решетке тэнита можно найти четыре плоскости с эквивалентным расположением атомов (рис. 46, IV). Они располагаются параллельно граням октаэдра. Поэтому метеориты в ходе $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и приобретают октаэдритовую структуру, отражающую направления преимущественного роста пластин камасита. В зависимости от направления распила метеорита по отношению к октаэдритовой ориентировке его пластин видманштеттеновы фигуры, проявляющиеся при травлении, имеют тот или иной рисунок. Сами же пластины в сечении выглядят как **б а л к п**.

Камасит от тэнита отличается еще двумя признаками, важными для понимания процесса формирования особенностей структуры октаэдритов. Во-первых, коэффициент диффузии никеля в камасите на ~ 2 порядка выше, чем в тэните (при одной и той же температуре), во-вторых, растворимость никеля в камасите намного выше, чем в тэните. Поэтому, например, образующаяся на границе тэнит — камасит новая ячейка решетки камасита «выталкивает» избыточные атомы никеля; кама-

сит растет в основном за счет атомов железа. Часть атомов никеля, теряя связь с ячейками, начинает диффундировать внутрь камасита, так как растворимость никеля в камасите сначала медленно растет с падением температуры (см. диаграмму на рис. 47). Однако гораздо больше

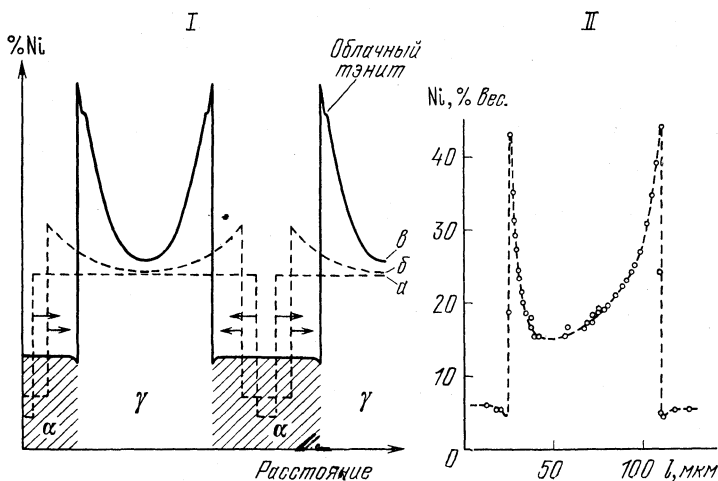


Рис. 48. I — серия последовательных теоретических профилей распределения концентрации никеля в метеоритном никелистом железе в процессе его остывания и роста камаситовых пластин: а — при выравнивании концентрации никеля в камасите и тэните путем диффузии, б — при диффузии, недостаточной для выравнивания концентрации никеля в тэните, в — при прекращении диффузии. II — экспериментально полученный М-профиль концентрации никеля в тэните метеорита Эгвекипот. (Пляшкевич и др., 1980.)

никеля уходит в остающийся тэнит. Там он тоже рассасывается путем диффузии и тем самым все больше снижает температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения остающегося тэнита.

Пока температура достаточно высока, чтобы поддерживать диффузию внутри камасита и тэнита, распределение никеля в соответствующих областях сохраняет вид, показанный на рис. 48 линией а. Но при дальнейшем охлаждении диффузия уже не успевает выравнивать концентрацию никеля в тэните, а между тем никель продолжает непрерывно поступать на его границу: растущая камаситовая пластина оттесняет в оставшийся тэнит все

новые порции никеля. Поэтому прямоугольный профиль распределения никеля в сечении тэнитового слоя сменяется на М-образный (кривая *б* на рис. 48), причем пики концентрации никеля на границе тэнит — камасит становятся всё выше и острее, а концентрация никеля в центре тэнитовой области оказывается ниже равновесного значения, соответствующего данной температуре. Возникает состояние переохлаждения тэнита, которое может в дальнейшем привести к зарождению в центре тэнитовых областей новых камаситовых листков, более мелких и тонких, отстающих в росте от уже больших камаситовых пластин, т. е. к образованию плессита.

При $t \approx 500^\circ\text{C}$ пластины камасита оказываются выросшими настолько, что, продолжая растворять никель во всё большей концентрации, поглощают его столько, что никеля, освобождающегося при образовании новых камаситовых ячеек, уже не хватает (хотя в тэнит его уходит все меньше из-за уменьшения диффузии). Тогда в камасит начинает уходить никель из узкого пограничного слоя тэнита, толщина которого определяется скоростью диффузии и составляет обычно несколько микрон. В результате в гранцентрированной решетке появляются дефекты.

При дальнейшем падении температуры заметно снижается диффузия и в камасите. Одновременно понижается и растворимость в нем никеля. Тогда картина меняется: никель начинает уходить из камасита в тэнит, но уже не из всей камаситовой пластины, а лишь из ее пограничного слоя. Из-за разницы в коэффициентах диффузии в камасите и тэните никель проникает в тэнит на значительно меньшую глубину, «залечивая» возникшие раньше дефекты. Однако залеченный слой оказывается гораздо тоньше того, где возникли дефекты (из-за дальнейшего уменьшения скорости диффузии). Поэтому на небольшом расстоянии от границы тэнитовой области все же остается слой «незалеченного» тэнита, который называют облачным.

Количество камасита и тэнита в метеорите при любой температуре t определяется диаграммой состояния никелистого железа. Если пересечь диаграмму горизонтальной линией, соответствующей выбранному значению t (линия b_1b_2 на рис. 47), то соотношение между количе-

ством выросшего камасита и сохранившегося тэпита определится отношением отрезков Bb_2/b_1B , причем равновесные концентрации никеля в камасите и тэните определяются при этом положением точек b_1 и b_2 соответственно.

Диаграмма состояния позволяет понять, почему метеориты с низким содержанием никеля ($\sim 7\%$ вес.) оказываются состоящими почти целиком из камасита. В самом деле, у этих метеоритов при прекращении диффузии $c_1C/Cc_2 \approx 0$, и тэпит в них сохраняется лишь в виде тонких пленок, облегающих пластины камасита. При содержании никеля около 50% вес. сохраняется почти весь тэнит, так как $c_1C/Cc_2 \approx 1$.

Чем меньше содержание никеля в исходном тэните, тем при более высокой температуре начинается фазовое превращение и тем дольше (при прочих равных условиях) длится рост камаситовых пластин и тем более толстыми они оказываются к концу роста, когда замораживается диффузия. Это в целом объясняет, почему метеориты с высоким содержанием никеля являются тонкоструктурными, а метеориты с низким содержанием никеля — грубоструктурными.

Иногда камаситовые пластины оказываются настолько толстыми (~ 50 см), что октаэдритовая структура не идентифицируется. Такие метеориты раскалываются по граням кубической решетки (граням гексаэдра) и называются гексаэдритами.

М-образные профили никеля в сечении тэнитовых слоев железных метеоритов были обнаружены в конце 50-х гг. советскими исследователями, впервые применившими тогда для изучения метеоритов метод электронного микронзондирования (Явнель и др., 1958). Однако в целом процесс формирования этих профилей (схематически описанный выше) стал понятен только в середине 60-х гг. благодаря работам Дж. Голдстейна, В. Бухвальда и других исследователей, так как потребовалось уточнение наших представлений и о фазовых превращениях, и о самой диаграмме состояния никелистого железа, и о коэффициентах диффузии никеля в тэните и камасите при разных температурах и давлениях, и о влиянии примесей (в частности, фосфора) на зарождение центров камаситовых пластин и их дальнейший рост. Большую роль сыграло развитие

метода электронного микрозондирования, позволившее получать профили распределения никеля в камасите и тэните с большим разрешением (до 1—3 мкм) *).

Дж. Голдстейн (1965; Голдстейн и Огилвц, 1965) провел ряд модельных расчетов роста камаситовых пластин, варьируя содержание никеля в исходном тэните и скорости охлаждения (а следовательно, продолжительность процесса роста), а также другие параметры (например, расстояние между зародышами камасита). С помощью ЭВМ оказалось возможным добиться расчетного профиля распределения никеля, сходного с наблюдаемым в разных метеоритах. Это позволило оценить скорости остывания вещества железных метеоритов в недрах родительских тел, а затем и размеры этих тел. Тогда же Дж. Вуд (1964) показал, что оценить скорость остывания можно, воспользовавшись шириной тэнитовой пластины и концентрацией никеля в ее центре (при известном среднем содержании никеля в метеорите).

Оба эти метода дали согласные, но удивительные результаты: оказалось, что в интервале температур 600—400 °С когда преимущественно шел рост камаситовых блоков, вещество октаэдритов остывало со скоростью порядка 1—10° за 10⁶ лет, а иногда и медленнее.

Аналогичный вывод был сделан и для железо-каменных метеоритов, металлическая часть которых тоже обладает октаэдритовой структурой.

Изучение металлических частиц, присутствующих в метеоритах других классов, в частности, в хондритах, показало, что в этих частицах тоже присутствуют тэнит и камасит, причем профиль распределения никеля в этих фазах обычно сходен с профилями, полученными для железных метеоритов (Вуд, 1965, 1967). Для того чтобы объяснить эту особенность строения металлических частиц хондритов, Дж. Вуд выдвинул предположение, что силикаты, разделяющие металлические частицы, в горячем состоянии не являются сколько-нибудь существенным препятствием для диффузии атомов железа. Поэтому ме-

*) Дж. Голдстейн (1977) на 40-м Ежегодном собрании Метеоритного общества сообщил о том, что в США создан новый аналитический микроскоп с разрешением рентгеновского луча, достигающим 50 нм (0,05 мкм). Эта техника позволит исследовать фазовые превращения в тонкозернистом плессите и т. д.

таллические частицы могут свободно обмениваться этими атомами друг с другом.

Это позволило Вуду, используя методику, разработанную им для железных метеоритов, оценить скорости остывания хондритов. Он получил неожиданный результат: большинство хондритов остывало со скоростью того же порядка, что и железные метеориты, а именно, со скоростью $\sim 10^\circ$ за 10^6 лет в интервале температур $550-450^\circ\text{C}$.

Необычайно малые скорости остывания метеоритов разных классов на интервале температур в несколько сотен градусов означают, что метеоритное вещество оставалось горячим в течение миллионов и даже миллиардов лет. Чтобы так долго хранить тепло в космическом пространстве, это вещество должно было — в отсутствии достаточно мощных источников тепла — находиться глубоко в недрах родительских тел, скрытое толстым теплозащитным слоем.

Расчеты, проведенные Дж. Вудом (1965; 1967), показали, что если даже теплозащитный слой состоял из вещества с низкой теплопроводностью (например, из каменистого вещества хондритного состава), то и в этом случае его толщина должна была составлять $70-200$ км. Это и дает нижний предел размеров первичных родительских тел метеоритов разных классов в $140-400$ км и показывает, что ими должны были быть крупные астероиды.

Лишь очень немногие метеориты из числа имеющихся в наших коллекциях не несут в себе следов пребывания в недрах родительских тел.

Гипотеза расплавленных ядер. Единая система камаситовых пластин октаэдритов, на которую мы уже обращали внимание, свидетельствует о том, что фазовые превращения никелистого железа этих метеоритов шли, как правило, в крупных монокристаллах тэнита.

Просмотрев большое число плоскостей распада железных метеоритов, Дж. Вассон (1972) оценил размеры этих монокристаллов вплоть до 50 см для метеоритов химических групп IA - IB и более 50 см для метеоритов других групп. В некоторых случаях размеры монокристаллов оценены в 2 м.

Вообще говоря, механизм роста столь крупных монокристаллов внутри астероидов неясен. Обычно полагают, что они росли из расплава.

Предположение о расплавленных когда-то недрах первичных родительских тел метеоритов находит как будто свое подтверждение в самом существовании железных метеоритов и ахондритов, а также железо-каменных метеоритов. В самом деле, плавление вещества, близкого по составу к хондритам, сопровождавшееся дифференциацией, должно было закончиться полным или частичным разделением никелистого железа и силикатов и дать метеориты названных классов.

О существовании лав, излившихся на поверхность астероидов и быстро остывших, свидетельствует метеорит Ибитира (рис. 49). Этот небольшой метеорит (массой

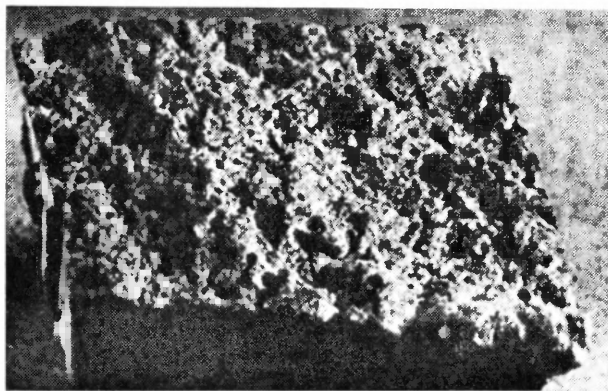


Рис. 49. Ахондрит Ибитира.

около 2,5 кг) выпал в Бразилии летом 1957 г. Он представляет собой ахондрит, точнее, базальт, насыщенный пузырьками газа, и является пока единственным метеоритом такого рода. Л. Вилкенинг и Э. Андерс (1975) показали, что Ибитира происходит из очень быстро остывшего слоя лавы небольшой толщины, всего в 20—25 м.

Об излиянии лав на астероидах свидетельствует и пироксеновый состав поверхности Весты (§ 7): дифференциация вещества на Весте длилась так долго и зашла так далеко, что не только разделились железо и силикаты, но и сами силикаты в свою очередь успели продифференци-

ровать: более легкие пироксены всплыли на поверхность (и потому стали доступны наблюдениям с Земли), а оливины должны были опуститься «на дно» силикатного слоя, под которым, вероятно, находится более тяжелое металлическое железо.

Итак, лавовые потоки на поверхности астероидов, медленно остывающие продукты дифференциации на больших глубинах позволяют как будто предполагать, что процесс дифференциации, — а значит, и плавления, — захватывал астероиды целиком, по крайней мере крупнейшие из них.

Но почему же ни один астероид, кроме Весты, из числа крупных астероидов, изученных спектральным методом, не обнаруживает в своем спектре такой мощной полосы поглощения пироксенов (или других силикатов), которая свидетельствовала бы об их дифференциации и плавлении? Х. Ларсон и У. Финк (1975) считают, что дифференцированные недра крупных астероидов могут быть скрыты под толстым слоем вещества, не прошедшего дифференциацию, и что на Весте излияние лавы было инициировано катастрофическим столкновением Весты с другим астероидом, происшедшим как раз в тот период, когда недра Весты были расплавлены.

К сожалению, неред гипотезой дифференцированных недр астероидов стоят и другие трудности, обойти которые нелегко. Эта гипотеза не может объяснить, например, существование железных метеоритов с силикатными включениями (химические группы IA-IV). Рассматривая их особенности, Дж. Вассон (1972) подчеркивал, что силикатные включения этих метеоритов имеют вовсе не хондритный состав (который получился бы, если бы силикаты и железо этих метеоритов пережили совместное плавление), как в случае железо-каменных метеоритов, а хондритный состав, свидетельствующий, что вещество включений плавлению не подвергалось.

Более того, эти включения (нередко угловатой, обломочной формы) вообще не могли находиться в расплаве никелистого железа сколько-нибудь длительное время. Р. Фиш и др. (1960) рассмотрели процесс всплывания под действием архимедовой силы силикатных шариков, оказавшихся в расплавленном никелистом железе, и на основании простейших расчетов получили, что процесс

всплывания идет столь эффективно, что уже через 10 лет все никелистое железо, находившееся в жидком состоянии в недрах астероидов, должно было бы полностью очиститься от силикатных включений любых размеров, вплоть до мельчайших шариков в доли миллиметра поперечником.

Кроме того, силикатные включения в железных метеоритах групп IA-IV содержат газы того же состава, что и обычные хондриты (первичные газы), что также несовместимо с их пребыванием в расплаве никелистого железа в течение того времени, которое было необходимо для кристаллизации железа.

Между тем металлическая часть этих метеоритов, как и другие железные метеориты, дает при травлении полированной поверхности великоленные видманштеттеновы фигуры, а измерения концентрации никеля в тэните и камасите приводят к типичным для железных метеоритов скоростям остывания — порядка 2° за 10^6 лет (Голдстейн и Шорт, 1967). Невозможно представить себе ситуацию, когда бы застывание расплава, столь быстрое, что не успели всплыть силикаты, сопровождалось бы последующим остыванием, столь медленным, что успели вырасти крупные камаситовые пластины, тем более, что при кристаллизации должно было выделяться тепло, поддерживающее температуру.

Одним из наиболее удивительных представителей групп IA-IV железных метеоритов является метеорит Нечаево (см. рис. 45). Он представляет собой смесь угловатых обломков спликатов, погруженных в большие области чистого металла с ясно видимой видманштеттеновой структурой, типичной для среднеструктурных октаэдриков. В силикатах, однако, находятся хондры (Заварицкий и Кваша, 1952; Бухвальд, 1967), хотя и подвергшиеся метаморфизму в довольно сильной степени.

Сам Вассон и многие другие исследователи (например, Рамбалди и др., 1974) полагают, что метеориты групп IA-IV никогда не переживали плавления. Первичные монокристаллы тэнита метеоритов этих групп, согласно Вассону (1970а), были невелики (< 50 см), и он допускает, что они могли образоваться путем высокотемпературного отжига при температуре ниже температуры плавления. Высокотемпературный отжиг — выдержи-

вание металла при высоких температурах в течение длительного времени с медленным последующим охлаждением — хорошо известен в технике. Им пользуются для укрупнения кристаллов: при высокой температуре мелкие кристаллы имеют тенденцию сливаться в более крупные. Однако неясно, может ли подобный высокотемпературный отжиг приводить к выращиванию монокристаллов размерами в несколько дециметров на интервалах времени в миллионы лет.

Что касается образования самих крупных железных масс без дифференциации расплавленного вещества, то высказывался ряд гипотез, из которых наиболее интересной представляется гипотеза Б. Ю. Левина (1965) об образовании их путем диффузии в твердом состоянии в горячих, но не расплавленных недрах астероидов.

В железных метеоритах групп IIIA-IIIВ, в отличие от метеоритов групп IA-IV, никогда не встречаются силикатные включения. Первичные кристаллы тэнита этих метеоритов были гораздо больших размеров. Так, например, метеорит Агпалилик представляет собой октаэдрит, сформировавшийся из монокристалла тэнита, размерами превышающего 2 м (Бухвальд, 1971). Дж. Вассон (1972) и некоторые другие исследователи считают, что столь крупные монокристаллы тэнита могли образоваться в процессе роста из расплава.

Между тем оценки скоростей остывания метеоритов групп IIIA-IIIВ составляют $\sim 5^\circ$ за 10^6 лет (Голдстейн и Шорт, 1967), что в пределах ошибок определения совпадает со скоростями остывания метеоритов групп IA-IV*). Это должно как будто означать, что метеориты групп IA-IV и IIIA-IIIВ находились в первичном родительском теле (или первичных родительских телах) на сходных глубинах. Чем вызваны различия образовавшихся метеоритов, неясно. Дж. Вассон (1972) полагает, что скорости остывания метеоритов могли контролироваться не обязательно теплозащитным слоем, а возможно, чем-то другим, например, уменьшением светимости молодого

*) Более высокие скорости остывания метеоритов групп IIIA-IIIВ, полученные Дж. Вудом (1964), по-видимому, ошибочны (Вассон, 1972).

Солнца на стадии T Тельца *). В этом случае, по мнению Вассона, глубина залегания метеоритов должна была бы быть настолько малой, чтобы «чувствовать» изменение инсоляции со шкалой времени порядка 1 млн. лет (порядка 5—10 км).

Еще сложнее обстоит дело с железными метеоритами группы IVA. А. Морен и Дж. Голдстейн (1977) показали, что скорости остывания разных членов этой группы отличаются более, чем на порядок. Они имеют значения от 3° за 10^6 лет для метеоритов с более высоким содержанием никеля до 50° за 10^6 лет для метеоритов с низким содержанием никеля. Этот факт интерпретируется Мореном и Голдстейном как указание на то, что метеориты группы IVA не связаны генетически друг с другом **).

Следует заметить, что Дж. Голдстейн (1965) и раньше обращал внимание на то, что у метеоритов с разным содержанием никеля получаются систематически разные скорости остывания (по совокупным данным для железных метеоритов кажется, что остывали медленнее метеориты с меньшим содержанием никеля). Не исключено, что зависимость скорости остывания от содержания никеля объясняется какими-то систематическими ошибками метода или даже неверными представлениями о росте октаэдритовой структуры метеоритов.

Источники тепла и расчеты термической истории астероидов. Анализ возможности нагрева недр астероидов до высоких температур и их термической истории представляется в настоящее время весьма сложной проблемой. Для того чтобы вещество метеоритов пережило стадию плавления, требуется достижение температур порядка 1500°C (для никелистого железа и большинства силикатов). Гипотеза об образовании железных метеоритов путем диффузии в твердом состоянии (Левин, 1964, 1965) требует, правда, меньших, но все же достаточно высоких температур — порядка $800\text{—}1000^\circ\text{C}$.

Для обеспечения столь высоких температур должен был существовать источник тепловой энергии родитель-

*) Заметим, однако, что нет прямых указаний на то, что Солнце проходило стадию T Тельца, и не доказано, что эту стадию проходят все звезды солнечной массы.

**) Следует сказать, что Дж. Виллис и Дж. Вассон (1978а, б) подвергли данные Морена и Голдстейна серьезной критике.

ских тел метеоритов, обеспечивающий эффективный нагрев хотя бы центральных их частей. Этот источник неизвестен.

Как уже говорилось, размеры астероидов, ставших первичными родительскими телами метеоритов, составляли 150—400 км и лишь у немногих могли быть порядка десятков километров. В начале 50-х гг. существовало мнение, что астероиды могли быть нагреты в нужной степени долгоживущими радиоактивными изотонами урана, тория и калия-40, обладающими большой способностью тепловыделения при распаде. Но трудности, связанные с отсутствием ЭВМ и плохим знанием содержания урана, тория и калия-40, долгое время не позволяли провести необходимые расчеты.

Расчеты термической истории астероидов были пачаты в нашей стране по инициативе и под руководством Б. Ю. Левина. Когда Е. А. Любимова и А. Г. Старкова (1954), а затем С. В. Маева (1959) провели такие расчеты, то сначала показалось, что у крупнейших астероидов поперечником в сотни километров их центральные области могли разогреваться до указанной выше температуры. Почти одновременно сходные результаты были получены и за рубежом (Аллен и Джекобс, 1956). Однако вскоре более точные химические анализы хондритов показали, что содержание калия-40 в родительских телах метеоритов было значительно ниже, чем предполагалось в этих расчетах. Использование новых данных для расчетов (Маева, 1963) показало, что нужные температуры могли бы быть достигнуты в недрах более крупных, не существующих среди астероидов тел диаметром более 1000 км. Для сильного разогрева более мелких тел темп тепловыделения оказался недостаточным из-за более существенного у них оттока тепла к поверхности и потерь на излучение в космическое пространство.

Г. Юри (1955) высказал предположение, что в нагреве астероидов могли сыграть роль те короткоживущие радиоактивные изотопы, которые образовались в галактическом нуклеосинтезе и, еще не успев распасться, могли войти в состав астероидов. Сделанные Юри оценки начального содержания таких изотопов (на основании космической распространенности соседних стабильных изотопов) показали, что заметное тепловыделение мог

дать только Al^{26} *). Эту точку зрения разделяли и другие исследователи (Фиш и др., 1960; Левин, 1969), но начиная с 1962 г. стали предполагать, что необходимые короткоживущие радиоактивные изотопы образовались не при галактическом нуклеосинтезе, а много позже — при каком-то дополнительном синтезе на начальной стадии образования Солнечной системы: например, под действием солнечных космических лучей в протопланетном веществе (Фаулер и др., 1962) или в наружных слоях протосолнца на заключительной стадии его сжатия (Бернас и др., 1967), или под действием галактических космических лучей в межзвездном веществе (Ривс и др., 1970), или при вспышке сверхновой **).

Обилия Al^{26} , продуцируемые в перечисленных гипотетических процессах нуклеосинтеза, различны, и отчасти поэтому расчеты термической истории астероидов при нагреве этим изотопом долго не публиковались. Между тем представляло интерес хотя бы качественно оценить эффект, который мог дать распад Al^{26} в астероидах разных размеров. Накопец, Б. Ю. Левин и С. В. Маева (1972) опубликовали результаты подобных модельных расчетов, выполненных еще в 1968 г. Их расчеты были проведены для тел размерами от 100 до 5 км и охватывали промежуток времени в 10^7 лет. Начальная температура всего вещества астероидов принималась равной — $100^\circ C$ (что близко к равновесной температуре тел в современном

*) Период полураспада Al^{26} составляет всего около $0,76 \cdot 10^6$ лет, и поэтому вместе с надеждами на этот изотоп неявно предполагают, что сами астероиды образовались не позже, чем через несколько миллионов лет после нуклеосинтеза. Заметим, что сам Юри в 1957—1958 гг. отказался от идеи разогрева астероидов каким бы то ни было радиоактивным изотопом в связи с результатами изучения Луны: разогретая теми же изотопами Луна не успела бы остыть, а между тем Юри считал, что ее недра холодные. Б. Ю. Левин и С. В. Маева (1972) обратили внимание на то, что аргументация Юри неверна, поскольку Луна могла формироваться из уже успевших остыть астероидоподобных тел (планетезималей).

* *) В настоящее время последняя точка зрения приобретает все больше сторонников. Считают, что продукты дополнительного нуклеосинтеза образовались при вспышке сверхновой, расположенной в окрестностях протопланетного облака (на расстоянии в несколько десятков парсеков), точнее, в ее H-оболочке. Расширяясь, H-оболочка достигла протопланетного облака, инжектировала в него свое вещество и послужила триггером для начала сжатия облака и рождения Солнечной системы.

кольце астероидов), и предполагалось, что в ходе всей тепловой истории астероида температура его поверхности остается близка к этому значению. Начальное содержание Al^{26} в астероидном веществе задавалось таким образом, чтобы при отсутствии оттока тепла вещество хондритного состава можно было бы нагреть до а) 1500 и б) 600 °С, что соответствует необходимому интегральному тепловыделению при распаде Al^{26} в 320 и 140 кал на 1 г вещества соответственно. Тепловыделение при распаде U , Th и K^{40} за 10^7 лет составляло бы 3—4 кал/г, так что при расчетах им можно было пренебречь.

Расчеты, проведенные с учетом как решеточной, так и лучистой теплопередачи, показали, что при тепловыделении 320 кал/г температура плавления вещества (1200—1400 °С) могла бы достигаться в центральных областях тел диаметром ≥ 100 км, причем высокие температуры (> 1000 °С) сохранялись бы на протяжении десятков миллионов лет. В телах диаметром ≥ 40 км температуры в центре могли бы достигать 800—1000 °С, и этого было бы достаточно для объяснения термального метаморфизма и многих особенностей структуры метеоритов. В мелких астероидах, диаметром в ~ 20 км, температуры не могли превышать 500 °С.

При низком тепловыделении (140 кал/г) максимальные температуры в недрах астероидов размерами в 100, 40 и 20 км достигали бы ~ 500 , 400 и 150 °С соответственно.

Позднее подобные расчеты повторялись неоднократно (Ли и др., 1976; Херндон и Херндон, 1977) и привели к аналогичным результатам.

Что касается скорости остывания нагретых астероидов, то судить о ней можно по рис. 50, где показано изменение температуры тел разных размеров, лишенных после нагрева источников тепла. Видно, что у 100-километровых тел скорость остывания в интервале 1500—1000 °С составляет около 50° за 10^6 лет, у 20-километровых тел — 700° за 10^6 лет (вплоть до температур замораживания диффузии), у 5-километровых тел остывание от 1500 до —100 °С происходит всего за $\sim 2 \cdot 10^5$ лет, что соответствует средней скорости остывания порядка 1° за 100 лет. Быстрое ускользание тепла объясняет, почему такие тела не могли быть нагреты долгоживущими радиоактивными изотопами с малым темпом тепловыделения.

Гипотеза разогрева астероидов с помощью Al^{26} поставила перед исследователями метеоритного вещества новую задачу: пайти в метеоритах следы пребывания Al^{26} в нужных количествах. Поскольку Al^{26} , распадаясь, дает стабильный изотоп Mg^{26} , поиски сводились к выявлению избытка Mg^{26} . Начиная с 1970 г. работы, посвященные

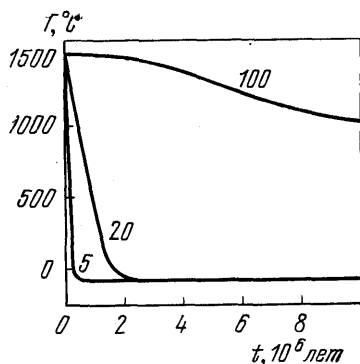


Рис. 50. Остывание астероидов разных размеров от гипотетической начальной температуры $1500^{\circ}C$ в отсутствие источников тепла. На кривых указаны диаметры астероидов в километрах. Температура поверхности астероидов предполагается равной $100^{\circ}C$. (По Б. Ю. Левину и С. В. Маевой, 1972.)

этому вопросу, шли непрерывным потоком, причем исследователи приходили попеременно к противоположным результатам. У. Кларк и др. (1970) первыми сообщили, что им удалось обнаружить различия в отношении Mg^{26}/Mg^{24} в ряде образцов метеоритов. Затем Д. Шрамм и др. (1970) на основании более точных измерений опровергли результат Кларка и др. Кроме того, пересмотр разных процессов нуклеосинтеза показал как будто меньшую их эффективность в продуцировании Al^{26} по сравнению со сложившимися представлениями (Шрамм, 1971).

Но вот К. Грей и В. Компстон (1974) уверенно обнаружили значительный избыток Mg^{26} в хондре углистого метеорита Алленде и интерпретировали его как долгожданное подтверждение присутствия Al^{26} в эпоху образования астероидов. Однако вскоре оказалось, что в Алленде наряду с частицами, обогащенными Mg^{26} , есть и обедненные этим изотопом (Ли и Папанастасио, 1975). К аналогичным результатам пришел Мак-Свин (1977), анализируя частицы из матриц разных углистых метеоритов *). Они не могли содержать Al^{26} в количествах, не-

*) Это является одним из доводов в пользу гипотезы о том, что в состав астероидов вошли холодные межзвездные частицы, не подвергавшиеся испарению в протопланетном облаке.

обходимых для сильного разогрева астероидов (если даже он и не успел превратиться полностью в Mg^{26} задолго до образования астероидов).

Хотя вопрос о содержании Al^{26} не решен окончательно и продолжает дискутироваться (см., например, Ли и др., 1978), остается все меньше и меньше оснований предполагать, что Al^{26} играл решающую роль в нагреве астероидов.

Принципиально новую идею, не основанную на тепловыделении радиоактивных изотопов, высказали К. Сонет и др. (1968). Они предполагают, что астероиды могли быть разогреты токами Фуко, индуцируемыми в астероидах мощными облаками плазмы, несущимися от молодого Солнца на стадии Т Тельца. Однако для возникновения токов Фуко вещество астероидов нуждалось в предварительном, хотя и не сильном (до $200-300^\circ C$), нагреве, потому что лишь такой нагрев обеспечивает достаточную для возникновения токов Фуко электропроводность еще дифференцированного вещества хондритного состава.

Последнее обстоятельство ставит перед гипотезой индукционного нагрева серьезные трудности. Долгоживущие радиоактивные изотопы могли поднять температуру в недрах даже крупных астероидов (размерами порядка 400 км) всего до $30-50^\circ C$ (Маева, 1963). Для того чтобы предварительный нагрев мог обеспечить Al^{26} , его интегральное тепловыделение в телах размерами ≥ 100 км должно было составлять $60-80$ кал/г. Возможность такого слабого нагрева с помощью Al^{26} допускали, например, Б. Ю. Левин (1969) и сам К. Сонет (Сонет и др., 1970). Но был ли действительно реализован этот механизм нагрева, остается неясным.

Недавно Б. Ю. Левин (частное сообщение) высказал интересную гипотезу о другом экзогенном источнике тепла, связанном со столкновениями астероидов. Частота этих столкновений могла быть большой в первые 100 млн. лет существования Солнечной системы. Мы еще вернемся к обсуждению этого вопроса и связанных с ним следствий (§ 9). Что же касается самого механизма разогрева астероидов во взаимных столкновениях, то он вызывает наименьшие сомнения.

§ 9. Промежуточные родительские тела метеоритов

В понимании той части истории, которую метеоритное вещество прошло на поверхности промежуточных родительских тел, большую роль сыграли исследования лунных образцов. При расшифровке истории последних исследователи постепенно проникались сознанием того, что история магматической дифференциации Луны была, вероятно, довольно простой и привела к образованию небольшого числа горных пород, а бесконечное разнообразие составов образцов лунного грунта и лунных брекчий связано с тем, что все они являются смесями частиц из разных мест лунной поверхности, образовавшимися в ходе многократного перемешивания вещества ударами падавших на Луну тел. Поэтому каждый отдельный образец включает исходные простые породы в разных пропорциях и к тому же не в их первоначальном виде, а измененными последующими ударными и тепловыми воздействиями.

Это направление мыслей породило представление о том, что многие типы метеоритов приобрели свою структуру не в недрах родительских тел, а на поверхности — в слое реголита, в той или иной степени аналогичного лунному реголиту. В большинстве случаев это должно было происходить на поверхности промежуточных родительских тел.

Кратерообразование на астероидах. Создание реголита. Как и на Луне, на крупных астероидах падающие на них тела создают слой раздробленного и перемешанного вещества с примесью самих упавших тел — реголит.

Как уже говорилось (§ 5), средняя хаотическая скорость тел в кольце астероидов в современную эпоху, определяемая дисперсией орбит, порядка 5 км/сек . Явления, происходящие при столкновениях тел с подобными скоростями, грандиозны. При скорости $\sim 5 \text{ км/сек}$ каждый грамм астероидного вещества несет кинетическую энергию порядка $1,3 \cdot 10^{11} \text{ эрг}$ (около 13 кдж , или 3 ккал). Когда даже небольшой астероид врежется в поверхность более крупного, вся кинетическая энергия его «мгновенно» освобождается и происходит гигантский взрыв. Сонриковские в момент столкновения слоя астероидов под-

вергаются столь сильному сжатию, что частично обращаются в газ, частично плавятся. От места удара во все стороны расходятся ударные волны сжатия и разрежения, которые давят, крошат и встряхивают вещество. Над астероидом огромным фонтаном взлетают обломки и пыль. На его поверхности остается кратер, а под ним — обширная зона раздробленных пород уплощенной чашеобразной формы (рис. 51).

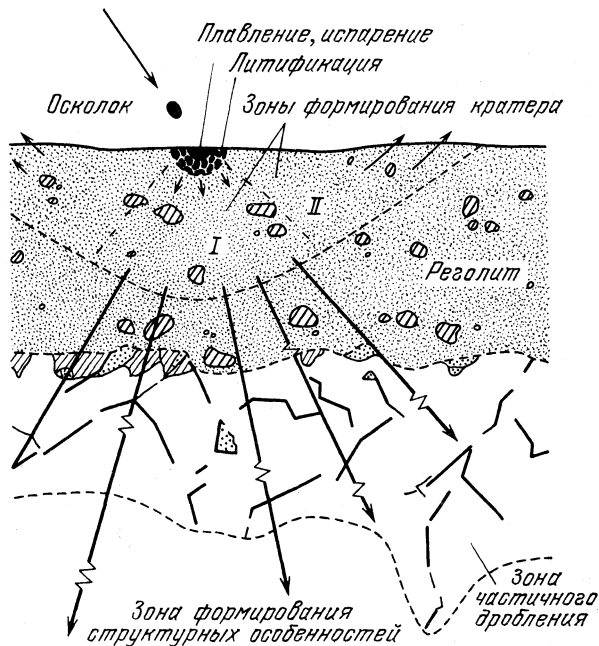


Рис. 51. Схема кратерообразования на астероиде. Пояснения в тексте.

В процессе кратерообразования при все новых и новых столкновениях астероидов друг с другом и формируется реголит. Этот механизм создания реголита на астероидах, — как в прошлом, так и теперь, — сам по себе не вызывает сомнений. Хотя массы астероидов невелики, они все же способны удержать некоторую часть обломков.

Скорость убегания v_e (вторая космическая скорость) на астероиде сферической формы с массой M и радиусом r

определяется соотношением

$$v_e^2 = \frac{2GM}{\rho},$$

где G — постоянная тяготения.

Вводя в это соотношение среднюю плотность астероида δ , получим

$$v_e = 7,48 \cdot 10^{-4} \rho \sqrt{\delta} \text{ (СГС).}$$

Принимая, что у С-астероидов средняя плотность $\delta \approx 2 \text{ г/см}^3$, а у S-астероидов — $\delta \approx 3,5 \text{ г/см}^3$, получим при ρ , выраженном в км, значения v_e в м/сек:

$$\begin{aligned} \text{для С-астероидов } v_e &= 1,1 \rho, \\ \text{для S-астероидов } v_e &= 1,4 \rho. \end{aligned}$$

Следовательно, на Церере (С-астероид) скорость убегания составляет около 500 м/сек, на Весте (S-астероид) — около 400 м/сек. На астероиде диаметром $2\rho = 50 \text{ км}$ скорость убегания в зависимости от состава вещества составляет от 25 до 50 м/сек и даже совсем маленький астероид поперечником в 10 км способен удержать те обломки, которые разлетаются со скоростью менее 5—10 м/сек.

Д. Гоулт и др. (1963), анализируя экспериментальные данные о распределении скоростей обломков, разлетающихся при кратерообразовании, пришли к заключению, что на крупнейших астероидах поперечником в $\sim 200 \text{ км}$ около 85% взметнувшихся над астероидом обломков не в состоянии преодолеть притяжение астероида, так как они имеют $v_e < 50 \text{ м/сек}$, и вновь падают на поверхность астероида. Многочисленные астероиды поперечником в $\sim 100 \text{ км}$ удерживают около половины обломков. Правда, обломки, выброшенные из кратера, могут улететь от кратера на большие расстояния и даже залететь на обратную сторону астероида. Таким образом, возникновение кратера на астероиде должно сопровождаться возникновением над всем астероидом кратковременного облачка камней и пыли — своеобразной каменной «атмосферы». Падая на астероид, обломки и пыль усеивают его поверхность, но не покрывают ее толстым слоем.

Поясним сказанное примером. Представим себе, что Церера столкнулась с небольшим астероидным обломком и в результате этого на ней образовался кратер. Объем вещества, выбрасываемого из кратера, в сотни и тысячи

раз превышает объем тела, послужившего причиной кратерообразования. Поэтому при падении на Цереру тела поперечником в 100 м на ней появится кратер поперечником около 1 км, а на поверхность Цереры высыплется около $0,3 \text{ км}^3$ вещества, выброшенного из него.

Поверхность Цереры составляет около $2,5 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, и потому, допуская, что вещество, выброшенное из кратера, рассеется по Церере равномерно, получим, что оно покроем Цереру слоем пытожной толщины: средняя толщина такого «слоя» не превысит долей миллиметра. Вещество астероидного обломка, столкнувшегося с Церерой, будет примешано в этом «слое» в виде неощутимо малой примеси в доли процента.

На мелких астероидах ситуация примерно такая же, так как по меньшей их поверхности рассеивается существенно меньшая доля удерживаемого астероидом вещества, выброшенного из кратера.

Трудно ожидать, чтобы многократные столкновения астероидов привели к существенному накоплению оседающего материала. Тем не менее можно утверждать, что поверхностные слои астероидов находятся в раздробленном и частично перемешанном состоянии.

Как уже говорилось, за пределами кратера возникает зона дробления материала. Из рис. 51 видно, что эта зона простирается главным образом вдоль поверхности, проникая на сравнительно небольшую глубину. Размеры зоны дробления оказываются особенно велики на свежерасколотой поверхности астероида, т. е. на поверхности, еще не раздробленной падениями мелких тел, например, на поверхности, обнажившейся при катастрофическом столкновении астероидов. Трещины, возникающие при все новых падениях тел на астероид, быстро изъедают его поверхность, так что последующие падения тел происходят в уже раздробленный материал. Чем сильнее он раздроблен и разрыхлен, тем быстрее в нем затухают ударные волны, а это значит, что энергия падающего тела поглощается в меньшем объеме, создавая более мощные эффекты. Разлет обломков происходит при этом, однако, с меньшими скоростями, и астероид удерживает большую долю их.

Эксперименты на Земле позволили заключить, что при падении тела на поверхность, сложенную крупными моно-

литными блоками, типичные скорости разлетающихся астероидных обломков должны составлять сотни метров в секунду. Если же падение тела произойдет на раздробленную поверхность, то образующиеся обломки должны разлетаться со значительно меньшими скоростями — порядка десятков метров в секунду.

Пока мы не располагаем ни одной фотографией астероида, полученной с космического аппарата с малого расстояния. Но можно с уверенностью утверждать, что по внешнему виду астероиды не отличаются от спутников Марса — Фобоса и Деймоса, сплошь изрытых кратерами поперечниками от нескольких километров вплоть до едва различимых на снимках поперечниками в несколько метров. (Более мелкие кратеры на снимках выявить пока не удалось, но сомневаться в их существовании не приходится.)

Следы пребывания метеоритного вещества в реголите. Треки, инертные газы, микрократеры. В лунных образцах, взятых с таких небольших глубин, на которых имеется примесь вещества, находившегося в прошлом на самой поверхности, были обнаружены следы облучения не только энергичными галактическими космическими лучами (проникающими в вещество на глубину в десятки сантиметров и даже в метры), но и следы облучения мягкими солнечными корпускулярными потоками. Последние представляют собой частицы, непрерывно истекающие из солнечной короны (солнечный ветер), и немного более энергичные частицы, испускаемые при солнечных вспышках (солнечные космические лучи). Они проникают в вещество лишь на малые доли миллиметра *).

Если облучение галактическими космическими лучами проявляется двойко — в присутствии космогенных радиоактивных изотопов и в виде треков (топких капалов, возникающих в результате нарушения структуры твердого вещества при полете таких частиц), то облучение вещества солнечными космическими лучами приводит только к созданию треков (энергия частиц оказывается недостаточной для ядерных реакций). Изучение треков, созданных сол-

*) В галактических космических лучах присутствует и мягкая компонента с энергией частиц того же порядка, что у солнечных космических лучей, но интенсивность этой компоненты по сравнению с интенсивностью солнечных космических лучей невелика: в районе кольца астероидов она приблизительно в 100 раз ниже.

нечными космическими лучами, в лунных образцах потребовало специальной методики травления и подсчета треков. Их иоверхностная плотность оказалась в 10^3 — 10^4 раз больше, чем треков от галактических космических лучей, и достигает 10^9 — 10^{12} см⁻². Поэтому подсчет плотности треков от солнечных космических лучей потребовал применения электронного микроскопа.

Поскольку солнечные космические лучи проникают в глубь вещества на ничтожную глубину, поиски созданных ими треков в метеоритах до конца 60-х годов вовсе не проводились. Считалось, что следы облучения этими лучами могли иметься лишь в поверхностном слое метеорита, который утрачивается при абляции в земной атмосфере.

Однако еще в 60-х гг. Г. Зюсс и др. (1964), пытаясь объяснить наличие в некоторых метеоритах — хондритах и ахондритах, — инертных газов солнечного состава *), выдвинули идею о «вколачивании» в вещество метеоритов солнечных газов, т. е. частиц солнечного ветра. Позже было показано, что инертные газы, в соответствии с ожиданиями, при таком происхождении не распределены в частицах метеоритного вещества равномерно, а концентрируются в их поверхностных слоях. Спустя несколько лет, когда усовершенствованную трековую методику, разработанную для лунных образцов, применили к изучению отдельных кристалликов метеоритного вещества, удалось увидеть и треки, возникшие при «вколачивании» в частицы метеоритного вещества более энергичных частиц солнечных вспышек. Треками солнечного происхождения оказались пронизанны на глубину в несколько десятков микрон поверхностные слои некоторых кристалликов, извлеченных из внутренних частей метеоритов, богатых солнечными газами (рис. 52 **). Это показывало, что такие кристаллики, прежде чем войти в метеорит, были доступны облучению солнечными космическими лучами.

*) Эти газы были впервые обнаружены В. В. Чердынцевым и К. К. Абдулгофаровым (1956). Э. К. Герлинг и Л. К. Левский (1956 а, б) предполагали, что они были захвачены из протопланетного облака. О других гипотезах происхождения этих газов см. Дю Френ и Андерс (1962), Фредриксон и Кейл (1963).

**) Обзор истории изучения треков солнечного происхождения в метеоритах содержится в работах П. Пелласа (1972) и Р. Раяна (1974).

Возник вопрос о том, где и когда произошло облучение метеоритных частиц солнечными корпускулярными потоками. Сначала высказывалось предположение, что облучение происходило в космическом пространстве. Основанием

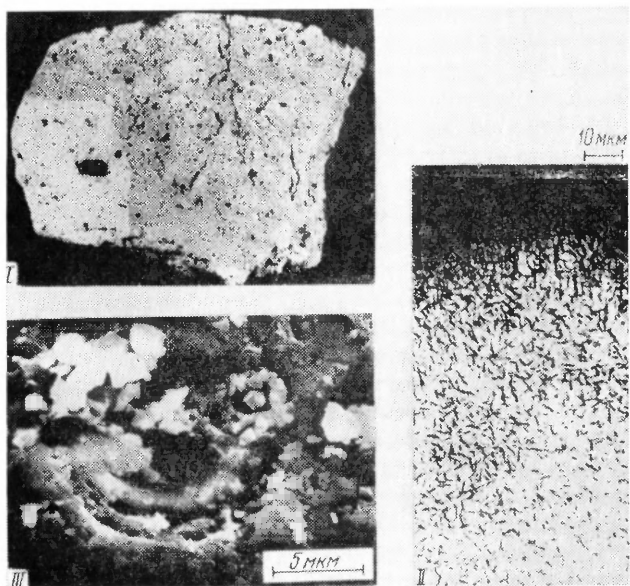


Рис. 52. Ахондрит Капоета. *I* — поверхность распила метеорита. *II* — треки солнечного происхождения на полированной и протравленной поверхности кристаллика пироксена из того же метеорита (фотография Л. Вилкенинга, воспроизводится по Дж. Вассону, 1974). Наружная поверхность кристаллика — вверху. Плотность треков быстро убывает по мере удаления от нее. *III* — микрократер на стеклянной частице из того же метеорита. (По А. Нунапу и др., 1974.)

для этого служило наличие частиц, которые казались облученными изотропно, т. е. со всех сторон (Пелас и др., 1969). С другой стороны, было ясно, что к тому времени, когда происходило облучение метеоритных частиц солнечными корпускулярными потоками, космическое пространство должно было уже очиститься от газа и пыли и стать прозрачным. В противном случае эти потоки не смогли бы

достигнуть частиц: всего 10^{-3} г/см² вещества, рассеянного на пути наиболее энергичной их компоненты (солнечных космических лучей) к частице, оказалось бы непреодолимой преградой. Между тем только каменистая ильвь протопланетного облака, пошедшая на образование планет земной группы, до их аккумуляции, создавала «заслон» порядка 30 г/см² даже в том случае, если толщина протопланетного облака достигала в районе кольца астероидов $\sim 0,5$ а.е. Необходимая прозрачность космического пространства могла быть достигнута лишь тогда, когда пылевая компонента протопланетного облака уже собралась в крупные тела, а его газовая компонента оказалась выдута солнечным ветром.

По мере совершенствования техники анализа треков стало выясняться, что частицы метеоритного вещества в действительности облучены анизотропно. В метеорите Файетвилль удалось найти анизотропно облученные не только микрокристаллики, но и целые хондры, одна из

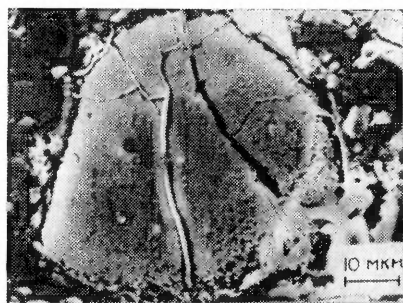


Рис. 53. Хондра из метеорита Файетвилль, подвергавшаяся сильному облучению солнечными космическими лучами на поверхности родительского тела, уже после того как была раздроблена. Вся поверхность хондры изъедена треками. Особенно пострадала часть, видимая справа внизу. (По Р. Райану, 1974.)

которых показана на рис. 53. Анизотропия облучения свидетельствует о том, что в период облучения частицы вещества лежали на поверхности более или менее крупных тел, а тот факт, что частицы в какой-то степени оказались облучены со всех сторон, показывает, что в период облучения они не были прочно связаны друг с другом и подвер-

гались перемешиванию и переворачиванию, очевидно, под действием многих выпадающих на поверхность этих тел мелких обломков.

Так вопрос о месте облучения частиц решается в пользу поверхности родительских тел, покрытых реголитом, причем облучение происходило до консолидации реголита в прочные плотные камни — метеориты.

В середине 70-х гг. на поверхности хондроподобных стеклянных частиц из ахондритов Канозта, Бунуну, Малверн и других были обнаружены микрократеры ударного происхождения (Раян и др., 1973; Нунан и др., 1974), совершенно аналогичные тем, которые находят на частицах лунного грунта (см. рис. 52). Сами стеклянные частицы, на поверхности которых найдены микрократеры, представляют собой застывшие стеклянные брызги, образовавшиеся, по-видимому, на поверхности промежуточных родительских тел метеоритов при ударах крупных тел, т. е. в ходе формирования реголита. Их бомбардировка космическими пылинками происходила на поверхности тех же тел.

Остается непонятным тот факт, что частицы, некогда свободно лежавшие на поверхности реголита, оказались впоследствии «замурованными» внутри плотных и прочных камней без заметных следов тепловых воздействий, которые привели бы к «залечиванию» трещин и разрушению микрократеров.

Следы пребывания метеоритного вещества в реголите. Метеоритные брекчии. Вряд ли можно сомневаться, что существует аналогия между историей образования лунных и метеоритных брекчий. Поэтому, несмотря на различия между структурами тех и других, современное понимание истории лунных брекчий и лунного реголита весьма полезно для понимания истории метеоритного вещества.

Метеоритные брекчии весьма разнообразны и широко распространены среди метеоритов всех классов и типов. По мнению некоторых исследователей (например, Мак-Колл, 1973), исключение составляют только железные метеориты. Но и у них некоторые особенности строения иногда нельзя объяснить без предположения брекчиевой структуры, хотя она и не выражена явно (см. ниже).

К числу брекчиевых метеоритов следует относить все метеориты, образовавшиеся из реголита промежуточных

родительских тел, независимо от того, состоят ли они из хорошо различимых крупных обломков или содержат лишь отдельные инородные включения, или же их «реголитное» происхождение устанавливается по каким-либо косвенным признакам (например, разная история отдельных компонентов и т. п.).

К сожалению, классификация метеоритных брекчий, которая, несомненно, помогла бы лучше понять механизм их образования, разработана плохо. Закономерности сочетаний вещества в брекчиевых метеоритах едва только начинают выясняться, но остаются плохо понятными. Еще недавно метеоритные брекчии делили всего на два класса — мопомиктовые и полимиктовые. Первые состоят из обломков, сходных по составу и структуре, сцементированных таким же, только мелкоиздробленным веществом. Вторые состоят из обломков, в большей или меньшей степени чуждых друг другу и/или вмещающему веществу как по составу, так и по структуре.

Дж. Вассон (1974) предложил выделить в особый класс разновидность брекчий, в которых обломки и вмещающее вещество относятся к одной и той же химической группе метеоритного вещества, но различаются между собой «строением и петрологией индивидуальных минералов», в частности, разной степенью их раскристаллизации, свидетельствующей о разной истории, предшествующей их объединению в брекчию. Вассон назвал такие брекчии геномиктовыми (от греч. *genos* — род). Их следует рассматривать как хорошо развитые мономиктовые брекчии: по сравнению с обычными мономиктовыми брекчиями вещество геномиктовых брекчий пережило, очевидно, более длительную и сложную историю, в ходе которой успели накониться заметные различия разных составных частей того материала, который впоследствии дал геномиктовую брекчию. Однако несомненно, что исходный материал был весьма однороден.

Многие исследователи выделяют в особый класс ксенолитовые метеориты. Это своеобразные полимиктовые брекчии, которые содержат лишь одиночные, мелкие инородные включения — ксенолиты. Нередко лишь эти ксенолиты, с трудом обнаруживаемые при изучении больших поверхностей распила метеоритов, выдают брекчиевую природу таких метеоритов. Других признаков брек-

чи обнаружить обычно не удается: границы некогда существовавших отдельных блоков, между которыми оказались вкраиленными ксенолиты, полностью и бесследно залечены.

Хорошо выраженными «крупноблочными» брекчиями являются многие богатые кальцием ахондриты. Одна из разновидностей этих ахондритов, — говардиты, — представляет собой обычно полимиктовые брекчии, а другая разновидность, — эвкриты, — почти целиком представлена, как ни странно, образцами мономиктовых брекчий. Гепомиктовые брекчии и ксенолитовые метеориты широко распространены среди хондритов, причем значительная доля именно гепомиктовых брекчий богата солнечными газами. У ксенолитовых хондритов замечена тенденция: вмещающее вещество часто формируется из хрупкого и легко дробящегося слабо метаморфизованного (или неметаморфизованного) вещества низких петрологических типов (до 4-го типа), тогда как в роли ксенолитов оказывается более прочное метаморфизованное вещество высоких петрологических типов 5—7 (Вассон, 1974).

В полимиктовых брекчиях встречаются удивительные комбинации веществ разных типов. Некоторые типы веществ вообще известны только в виде небольших включений и не встречены как индивидуальные метеориты, хотя сформировалось это вещество, безусловно, не в виде отдельных «крошек», а в виде крупных глыб. Лишь отдельные осколки, образовавшиеся в процессе дробления этих глыб, оказались занесены в чуждый им реголит, давший впоследствии полимиктовую брекчию.

Одно время казалось, что разнородность состава полимиктовых брекчий является указанием на неоднократные дробления и повторную аккумуляцию астероидов (Левин, 1949, 1959). Однако позднее было осознано, что полимиктовые брекчии могут быть объяснены смешением вещества двух тел, сталкивающихся с малыми скоростями, или даже смешением в пределах одного тела вещества, происходящего из разных его слоев или областей (Левин, 1965). Это было существенным шагом в сторону современных представлений об образовании брекчиевых метеоритов в слое реголита на поверхности промежуточных родительских тел.

Разнородность полимиктовых брекчий является одним из основных доводов в пользу существования самих про-

межзточных родительских тел метеоритов. В самом деле, у промежуточных родительских тел метеоритов некоторые их части, обнажившиеся при дроблении первичных родительских тел, являются глубинным разрезом первичных тел, разрезом, пересекающим многие слои его недр. Образование реголита на подобной поверхности открывает возможности перемешивания весьма разнородных обломков, происходящих из разных слоев или областей первичного родительского тела, от глубинных до поверхностных.

Существует и привнос пнородного вещества обломками чуждых тел, падающими на астероид с небольшими скоростями. Этот механизм, вероятно, является более эффективным при формировании вещества ксенолитовых метеоритов.

Приведем несколько примеров разпородной структуры брекчиевых метеоритов. В обыкновенных хондритах и даже ахондритах встречаются обломки углистых метеоритов (см., например, Вилкенинг и Клайтон, 1974). Между тем известно, что вещество углистых метеоритов не подвергалось сколько-нибудь значительному нагреву, тогда как обыкновенные хондриты и особенно ахондриты носят следы термального метаморфизма, т. е. следы нагрева. Едва ли можно придумать такие условия, которые обеспечили бы сохранность обломка углистого хондрита при нагреве окружающего вещества, необходимом для метаморфизма. Следовательно, вмещающее вещество сначала подверглось метаморфизму и приобрело свою структуру и лишь потом было раздроблено и перемешано. В это раздробленное и перемешанное вещество и был занесен чуждый ему углистый обломок. Очевидно, что дальнейшая консолидация вещества должна была произойти без заметного теплового воздействия.

Еще более удивительным является наличие хондритовых по составу и даже по структуре включений в железных и железо-каменных метеоритах. Такие включения содержат, например, железный метеорит Нечаево и железо-каменный метеорит Бенкуббин. Между тем происхождение железных метеоритов, как уже говорилось, связывают с их длительным пребыванием в сильно нагретом состоянии. Присутствие в них хондритовых включений едва ли можно объяснить, не апеллируя к брекчиевой природе железной части этих метеоритов.

Развитие экспериментальной техники, позволившее изучать небольшие образцы вещества, значительно расширило возможности изучения метеоритных брекчий и особенно ксенолитовых метеоритов, в которых инородного вещества мало. Изучение ксенолитов, выделенных из хондритов, подтвердило, что они не образовались *in situ*. Некоторые из них отличаются от окружающего вещества не только составом, но и ипой историей облучения космическими лучами. Другие обнаруживают следы ударных воздействий, проявляющиеся в виде тонких металлических и стеклянных жилок, тянущихся только в пределах ксенолитов. В настоящее время не вызывает сомнений, что ксенолиты представляют собой либо измельченное вещество других крупных тел, запесенное в реголит родительского тела данного метеорита падающими на него телами, либо частицы из других областей самого родительского тела.

Особого уноминания заслуживают силикатные включения со следами сильного облучения космическими лучами, обнаруженные в некоторых железных метеоритах. Так, в бедном никелем атаксите Эль Тако найдены силикатные частицы, подвергавшиеся длительному облучению галактическими космическими лучами, а в октаэдрите Эльга — частицы, подвергавшиеся облучению солнечными космическими лучами (Кашкаров и др., 1975). Следы облучения сохранились в них в виде треков. Между тем не вызывает сомнений, что, паходясь внутри метеоритов, эти включения экранировались веществом метеоритов от воздействия как солнечных, так и галактических космических лучей. Поэтому приходится сделать вывод, что Эль Тако и Эльга — брекчиевые метеориты и что силикатные частицы подверглись облучению до того, как вошли в эти железные метеориты. Но как смогли уцелеть треки в силикатных включениях, пока в окружающем их горячем никелистом железе шло формирование его структуры (в частности, единой октаэдритовой структуры Эльги), остается непонятным.

Консолидация реголита. На вопрос о том, когда и как происходила консолидация реголита, можно ответить, к сожалению, пока лишь в самых общих чертах. Одной из основных причин этого является крайне слабая изученность метеоритных брекчий. В частности, практически отсутст-

вуют исследования механической прочности метеоритов и ее связи со структурой метеоритов и их метаморфизмом. Между тем очень важно знать, в каких условиях сцементировалась та совокупность обломков и вмещающего вещества, которая ныне представляет собой брекчиевые метеориты.

Когда в метеорите углистый обломок окружен каким-то другим веществом, то очевидно, что это вещество когда-то должно было окружать его сначала в виде очень мелкой пыли, чтобы впоследствии не осталось крупных пустот. Они неизбежно получились бы, если бы первоначально брекчия состояла из однородных кусков щебня.

Преобразование неконсолидированного слоя реголита, но крайней мере в каменные брекчиевые метеориты, обладающие значительной механической прочностью, позволяющей им выдержать полет сквозь атмосферу без превращения в пыль, — происходило, по-видимому, в результате ударного воздействия тел, падавших в реголит, т. е. под действием той же причины, которая формировала реголит, дробя и перемешивая поверхностный слой родительских тел метеоритов (Венке, 1965).

Лабораторное моделирование процесса кратерообразования, проводившееся в Институте физики Земли АН СССР, показало, что в момент кратерообразования вещество мишени, оказавшееся внутри кругового конуса (обращенного внутрь мишени, с вершиной на поверхности в точке удара) с углом раскрытия $\sim 100^\circ$, вдавливаясь ударной волной внутрь мишени, частично спрессовываясь. Это и есть наиболее вероятное место консолидации реголита и образования брекчиевых метеоритов. (Выбрасывается из кратера вещество, оказавшееся за пределами указанного конуса.)

Процесс консолидации реголита, вероятно, можно разделить на две стадии: сначала сотрясения от сравнительно далеких ударов крупных тел о поверхность родительского астероида приводят «к утряске» реголита, ликвидирующей крупные пустоты между обломками, которые заносятся пылевой компонентой реголита (каменной мукой). Затем близкий удар, создающий заметные ударные давления, преобразует рыхлое сыпучее вещество в механически прочное. Опыты с лунным реголитом показали, что для этого нужны ударные давления ≥ 20 кбар, которые достигают-

ся при весьма умеренных скоростях ударяющего тела — порядка 1—2 км/сек (Аренс, 1975).

Ударная волна, проходя через вещество, кроме того, слегка подогривала его и таким образом «размораживала» диффузию. Эта диффузия в местах контактов частиц в условиях вакуума должна была сваривать вещество в прочные кампи. Следы такой «сварки» обнаруживаются иногда в виде каемок вокруг ксенолитов (рис. 54). Слипание частиц,

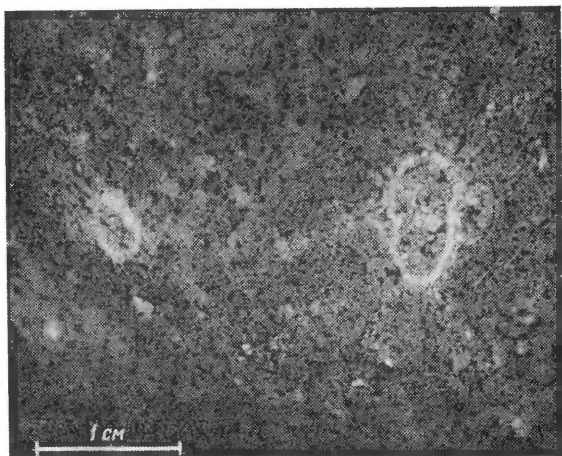


Рис. 54. Каемки вокруг ксенолитов в метеорите Фармингтон (по Р. Бинсу, 1967), возникшие, вероятно, при консолидации вещества метеорита.

несомненно, облегчала обнаруженная у некоторых из них изъеденность их поверхности треками от солнечных космических лучей, иногда до аморфного состояния, на глубине в несколько десятков микрон.

Конечно, консолидация реголита с участием диффузии требует при незначительном подогреве больших промежутков времени, и перемешивание реголита все новыми ударами падающих тел препятствовало консолидации. Однако интенсивность перемешивания быстро падает с глубиной, и на глубине порядка метра частицы реголита остаются неподвижными в течение миллионов лет (Андерс, 1975).

Следует отметить, что в истории метеоритного вещества дробление и консолидация происходили неоднократно, так что это вещество состоит из обломков разных поколений. В отдельных случаях такие обломки, — брекчия в брекчии, — идентифицируются без труда, как, например, в хондрите Адамс Каунти и в железо-каменном метеорите

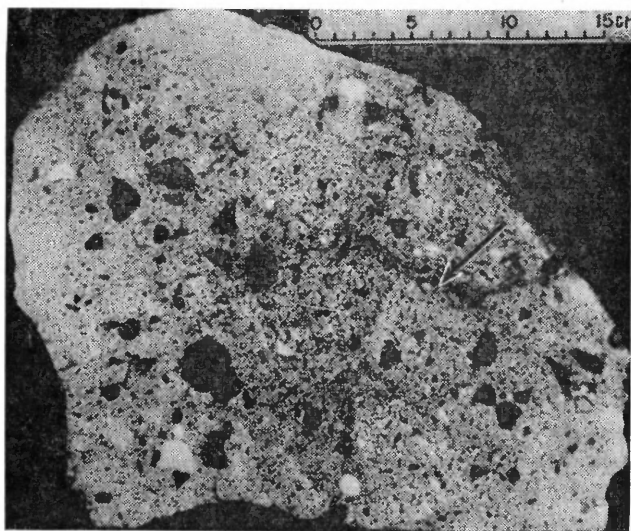


Рис. 55. Железо-каменный метеорит Маунт Падбюри. Стрелкой показан обломок, обладающий своей собственной брекчиевой структурой. (По Дж. Вассону, 1974.)

Маунт Падбюри: внутри крупных обломков видны чуждые им мелкие обломки, обладающие своей собственной, обычно более тонкой структурой (рис. 55).

До последнего времени считалось, что консолидация реголита (и формирование в процессе этого вещества брекчиевых метеоритов) происходила лишь в далеком прошлом. Это мнение отстаивал, например, К. Чепмен (1975), ссылаясь на то, что при современных больших относительных скоростях тел в кольце астероидов их взаимные столкновения должны приводить, главным образом, к потерям

вещества, разлетающегося в межпланетном пространстве, и не могут создать достаточно толстый слой реголита. Тонкий же реголит не может быть местом формирования брекчиевых метеоритов.

Изучение хондрита Сен Месмин опровергает такое представление. Этот метеорит, состоящий в основном из вещества LL-группы, содержит мелкие ксенолиты вещества H-группы. Среди нескольких изученных ксенолитов один оказался очень «молодым»: его K-Ar-возраст составляет всего $\sim 1,4 \cdot 10^9$ лет (Шульц и Сигнер, 1974). Возраст консолидированного вещества этого метеорита, или возраст брекчии, не может превышать возраст молодого ксенолита, а следовательно, он не более 1,4 млрд. лет. Хаотические скорости тел в кольце астероидов, а следовательно, и условия их столкновений, за последние полтора миллиарда лет не могли измениться заметным образом, и потому можно предполагать, что процесс формирования брекчиевого метеоритного вещества в астероидном реголите идет и в наши дни.

Другие эффекты, вызванные столкновениями астероидов. Столкновения астероидов друг с другом и с более мелкими телами являются причиной не только создания брекчиевой структуры метеоритов, но и многих тонких эффектов, возникающих на фоне предшествующей истории метеоритного вещества, в частности, на фоне его тепловой истории, протекавшей в недрах первичных родительских тел. Одни из этих эффектов связаны непосредственно с прохождением ударной волны, другие — с выделяющейся при столкновениях тепловой энергией. Многие признаки таких эффектов легко идентифицируются в метеоритном веществе и довольно хорошо изучены, особенно в обыкновенных хондритах. В качестве примеров остановимся на некоторых из них.

а) С прохождением ударной волны в каменных метеоритах связана перестройка решетки их силикатов. Дело в том, что катионы железа, входящие в состав этих силикатов и связывающие между собой кремнекислородные тетраэдры, могут находиться с последними в двух конфигурациях, M_1 и M_2 (разных у оливинов и пироксенов), слегка различающихся степенью симметрии и размерами. Равновесное соотношение между числом тех и других конфигураций определяется внешними условиями — тем-

пературой и давлением *). Лабораторные эксперименты показали, что в ударной волне соотношение числа конфигураций резко меняется, а в дальнейшем не восстанавливается. То же происходит при кратковременном сильном нагреве с последующей закалкой. Для того чтобы равновесие восстановилось, необходим нагрев с последующим медленным остыванием (отжиг).

Во многих метеоритах соотношение числа конфигураций M_1 и M_2 оказывается далеким от равновесного, соответствующего температурам остывших астероидов. Между тем, если бы вещество метеоритов не испытало никаких воздействий после того как медленно остыло в недрах первичных родительских тел со скоростью $\sim 10^\circ$ за 10^6 лет (§ 8), то такое равновесие должно было бы иметь место. Поэтому отклонение соотношения числа обеих конфигураций от равновесного интерпретируют как следы ударных воздействий или кратковременного вторичного нагрева и используют его для количественных оценок степени воздействия, испытанного метеоритным веществом (например, Даддон и Хафнер, 1971). При этом опираются на модельные эксперименты в лабораториях.

Существенное различие в свободной энергии обменного внутрикристаллического равновесия в оливинах и пироксенах (около $-0,5$ ккал/моль и от $-3,5$ до -5 ккал/моль соответственно) и разная температура замораживания катионного обмена (~ 1100 и ~ 500 °C соответственно) позволяют не только согласовать данные, полученные по степени разупорядочения катионов железа в оливине и пироксене, но и оценить скорость падения температуры.

Среди метеоритов, изученных с этой точки зрения, едва ли не наиболее неупорядоченное расположение катионов железа обнаружено в пироксенах метеорита Фармингтон. По данным Р. Даддона и С. Хафнера его могли создать ударные давления ≥ 1000 кбар.

б) При прохождении сильных ударных волн и/или интенсивном нагреве вещества подвижность катионов железа в силикатах возрастает настолько, что они могут покидать междоузлия решетки (Вуд, 1967). Легко диффундируя между кремнекислородными тетраэдрами, благодаря сво-

*) Подробно об этом и о методах регистрации соотношения числа обеих конфигураций с помощью метода мессбауэровской спектроскопии см. у Т. В. Малышевой (1975).

им малым размерам эти катионы нередко сливаются друг с другом в мельчайшие субмикронные частицы металлического безникелистого железа. Это приводит к потемнению силикатов, являющемуся одним из наиболее очевидных признаков перенесенного метеоритом сильного ударного или теплового воздействия. Частицы безникелистого железа имеют тенденцию скапливаться в местах нарушений структуры силикатов (например, по трещинам), образуя металлические жилки. Однако при большом увеличении видно, что такие жилки состоят из отдельных частиц (рис. 56). Результаты химического анализа подтверждают

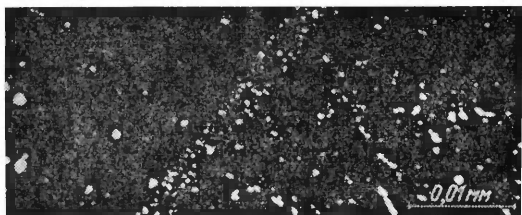


Рис. 56. [Металлическая жилка в метеорите Фармингтон при большом увеличении. Видно, что она состоит из отдельных частиц микронных размеров.

увеличение содержания металлического железа на 1—2% в темных областях метеоритных геномиктовых брекчий при сохранении содержания общего железа (Дьяконова и Харитонова, 1964).

Из-за ухода катионов железа из решетки силикатов в последних остаются некомпенсированными связи анионов кислорода. Поэтому у части оставшихся в решетке катионов железа может измениться характер связи с кремнекислородными тетраэдрами, так что железо из двухвалентного станет трехвалентным. Если процесс идет в оливине, не исключено превращение последнего в пироксен (микровыделения). Происходит относительное обогащение силиката магнием.

в) Низкие температуры тел, движущихся в кольце астероидов (§ 7), означают, что диффузия в астероидном веществе заморожена. В этих условиях структуры вещества, возникшие на ранних этапах существования астерои-

дов, сохраняются неизменными в течение миллиардов лет. Столкновения астероидов, при которых огромная кинетическая энергия переходит в тепловую, снова вызывают ее к жизни, хотя и на сравнительно короткое время.

В зависимости от температур, до которых оказалось нагретым вещество, и от длительности его остывания размороженная на время диффузия успевает создать разнообразные изменения микротекстуры и химического состава отдельных фаз. Как правило, это слабые изменения.

Тепловая энергия, получающаяся при образовании на поверхности астероидов мелких кратеров, быстро излучается в пространство: остывание очага в каменном веществе на глубине порядка метра идет со скоростью $\sim 100^\circ$ в сутки, так что вещество по космическим временным масштабам остывает практически мгновенно. При образовании крупных кратеров тепло оказывается захороненным на большой глубине и потому надолго. Вещество, оказавшееся в горячей зоне, останется нагретым многие годы, если очаг находится на глубине в несколько десятков метров, и тысячелетия, если очаг оказался на глубине около 1 км.

Как показал Дж. Вуд (1967), длительный и сильный нагрев вещества хондритов приводит к частичной или даже полной гомогенизации состава никелистого железа как в пределах отдельных зерен (исчезновение М-профиля), так и между зернами, потому что катионы железа, как уже говорилось, свободно диффундируют сквозь разделяющие эти зерна горячие силикаты. Одним из метеоритов с сильно выраженной гомогенизацией никелистого железа является опять-таки метеорит Фармингтон: по определениям Вуда, в пределах отдельных зерен колебания содержания никеля составляют около 1,4% (т. е. около 10% от среднего содержания в 14%), а колебания содержания никеля между отдельными зернами — около 3% (рис. 57). Теперь уже установлено, что вещество метеорита Фармингтон подвергалось вторичному нагреву до $\sim 1100^\circ\text{C}$ и остывало со скоростью $\sim 0,1^\circ$ в год (см. ниже). Следовательно, процесс гомогенизации его никелистого железа длился несколько тысяч лет.

Признаки закалки горячего вещества метеоритов, переживших вторичный нагрев, подробно рассматриваются в работе Б. Смита и Дж. Голдстейна (1977). Если вещество

метеорита испытало нагрев выше точки $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, то даже при не слишком быстром остывании (десятки градусов в год) γ -фаза переходит не в α -фазу, а в метаста-

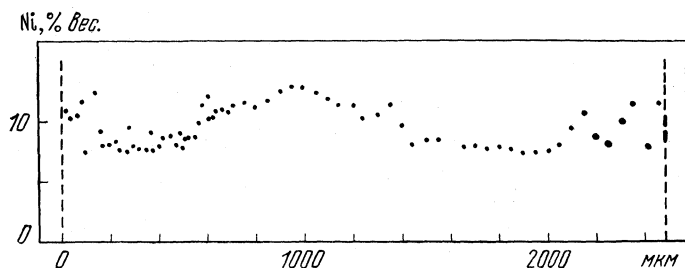


Рис. 57. Профиль концентрации никеля в сечении одного из крупных металлических зерен метеорита Фармингтон. (По Дж. Вуду, 1967.)

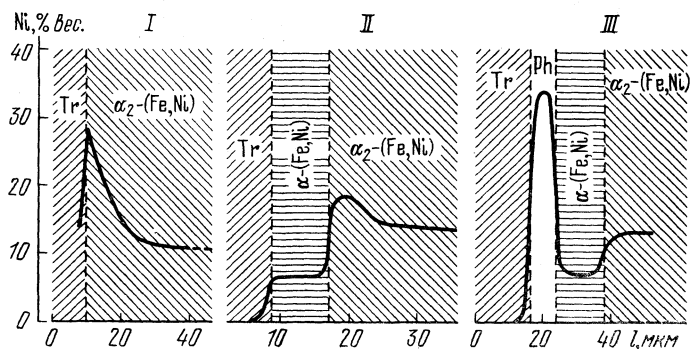


Рис. 58. Поведение никеля в метеоритах, подвергавшихся вторичному нагреву. I — на границе мартенсит-троилит в метеорите Рамсдорф, II — при появлении вторичного камасита в метеорите Фармингтон, III — при дополнительном появлении фосфида в метеорите Фармингтон. (По данным Б. Смита и Дж. Голдстейна, 1977.)

бильную α_2 -фазу (мартенсит). Камасит (его в данном случае называют вторичным), если и образуется, то в небольших количествах, по границам зерен металла (рис. 58). Количество образующегося вторичного камасита позволяет оценить скорость остывания вещества.

Уточнить историю вторичного нагрева вещества позволяет также поведение никеля в троилите. Дело в том, что никель растворяется в горячем троилите в концентрации, которая сильно зависит от температуры. При остывании вещества никель, растворившийся в троилите (6,05% вес. при 1250 °С), уходит из троилита и оседает на поверхности металлических зерен. При 900 °С равновесная концентрация никеля в троилите составляет уже всего 0,5% вес., а при 350 °С — около 0,01% вес. Если остывание происходит быстро, то диффузия не успевает, во-первых, в нужной степени выводить никель из троилита (так что к моменту замораживания диффузии его концентрация в троилите оказывается выше равновесной), а во-вторых, она не успевает выравнивать концентрацию никеля, оседающего на металлических зернах, в пределах этих зерен (см. рис. 58). Толщина слоя, обогащенного никелем, в зернах металла, а также повышенная концентрация никеля в троилите служат тоже основанием для расчетов скорости охлаждения вещества, причем используется аналогия с результатами математического и лабораторного моделирования процесса нагрева и охлаждения вещества.

Диагностическим является и поведение фосфидов железа. Они наблюдаются в хондритах с содержанием фосфора в металле выше 0,1% вес. Считают, что фосфиды выделяются при остывании вещества по границам зерен троилита в α - или γ -модификации. Размеры успевших вырасти зерен фосфидов, концентрация в них никеля и фосфора (точнее, степень ее отклонения от равновесной) являются критериями для уточнения термической истории метеоритов при вторичном нагреве.

Совокупность описанных и других эффектов (в частности, степень округлости зерен металла) позволяет восстановить термическую историю метеоритного вещества при вторичном нагреве. Результаты, полученные таким образом Смитом и Голдстейном, иллюстрирует рис. 59, на котором показаны температуры, достигнутые при вторичном нагреве и скорости последующего остывания восьми хондритов.

) У метеоритов, перенесших сильный нагрев, происходит также дегазация вещества. Это позволяет иногда датировать событие вторичного нагрева. Известна, например, группа из ~30 очень темных гиперстеновых хондри-

тов (к которой относится упоминавшийся метеорит Фармингтон), возраст газодержания которых составляет $\sim 0,6 \cdot 10^9$ лет по К-Аг-методу или $\sim 0,8 \cdot 10^9$ лет по U,Th-He-методу. Все метеориты этой группы обладают одними и теми же особенностями строения, описанными

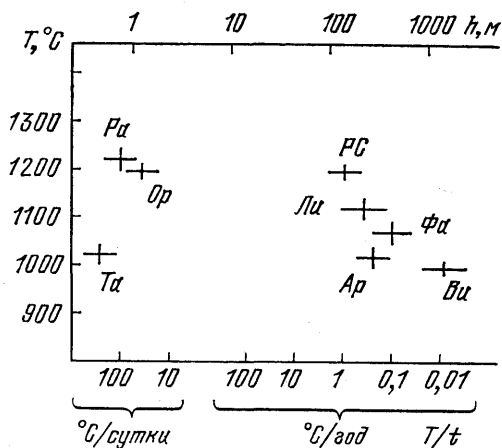


Рис. 59. Достигнутые максимальные температуры и скорости последующего охлаждения вещества метеоритов Фармингтон, Рамсдорф, Орвишио, Викенбург, Лаббок, Роуз Сити, Арапахо и Тадьера в результате испытанного ими сильного вторичного нагрева в недрах промежуточных родительских тел. На верхней шкале указаны примерные глубины залегания метеоритного вещества в период вторичного нагрева. (По Б. Смиуту и Дж. Голдстейну, 1977.)

выше для Фармингтона. В связи с этим Э. Андерс (1964, 1965) высказал предположение, что все метеориты этой группы образовались в одном и том же катастрофическом столкновении их родительского тела с другим астероидом около 0,6 млрд. лет назад.

Точнее, около 0,6 млрд. лет назад в результате дробления крупного астероида образовалось, по-видимому, последнее родительское тело этой группы темных метеоритов. В дальнейшем оно раздробилось в последующих столкновениях на мелкие обломки, выпавшие в виде метеоритов. О том, что на крайней мере еще одно столкновение было в истории этих метеоритов, свидетельствует

космический возраст метеорита Фармингтон, оцениваемый в $\sim 25\ 000$ лет, и неупорядоченность катионов железа в его пироксенах. Ведь та неупорядоченность, которая была создана в катастрофическом столкновении около 0,6 млрд. лет назад, должна была исчезнуть при последующем сравнительно медленном остывании (см. рис. 58).

О возможности более сильного влияния столкновений астероидов на формирование метеоритного вещества. В начале этого параграфа мы подчеркивали, что представление о существовании реголита на астероидах и о самом механизме его создания в процессе кратерообразования под действием падающих на астероиды тел сложилось только в 70-х годах под влиянием изучения лунного грунта. Благодаря этому были переосмыслены многие особенности строения метеоритного вещества, свидетельствующие о «реголитном» происхождении большей части метеоритов. И все же роль бомбардировки астероидов их же мелкими обломками в формировании метеоритного вещества вряд ли осознана полностью.

Влияние ударов, испытываемых родительскими телами метеоритов, по-видимому, не ограничивается описанными выше вторичными эффектами. Реголит на астероидах, хотя и формируется более медленными, чем на Луне, телами, может иметь толщину в десятки и сотни метров. Энергия ударных волн, расходящихся даже от небольшого кратера в момент его образования, не диссипирует полностью в столь тонком реголите, и потому слои, подстилающие реголит, в каком бы состоянии они ни находились, испытывают мощные ударные воздействия волн сжатия и разрежения, хотя и редкие, но многократно повторяющиеся при падении все новых обломков и образовании все новых кратеров. Кроме того, эти слои неоднократно подогреваются, черпая тепло из горячего очага под дном каждого нового кратера. Так под реголитом создаются условия, известные в технике какковка с низкотемпературным отжигом. Такие условия благоприятны для перестройки структуры поликристаллического вещества, в частности, для ориентированного роста монокристаллов и быстрого разрастания индивидуальных зерен, а также для слияния зерен с малоугловыми границами.

Подобные условия под реголитом могли способствовать разрастанию и раскристаллизации хондр в каменистом

веществе. С позиций подобных представлений, возможно, в будущем удастся объяснить возникновение некоторых удивительных структурных особенностей метеоритов, как,



Рис. 60. Хондрит Тимохина, Н5, массой около 50 кг. Обладает удивительной для каменного метеорита формой многогранника, напоминающего ромбический додекаэдр. Со всех сторон выступает пластина никелистого железа (показана стрелкой) толщиной в несколько миллиметров и площадью около 400 см². Архив Комитета по метеоритам АН СССР.

например, тонкой пластины никелистого железа, выросшей в хондритном веществе. Такая пластина, пронизывающая весь метеорит Тимохина, описана Е. Л. Криновым (1955) и показана на рис. 60. Бероятно, именно эти

условия ответственны за сохранение треков и микрократеров на поверхности мелких частиц, замурованных в метеоритах и, что еще более странно, — в хондрах.

Те же условия могут быть ответственны за формирование видманштеттеновых фигур железных метеоритов. В связи с этим следует обратить особое внимание на то, что феноменологическое описание процесса роста камаситовых пластин в остывающих монокристаллах тэнита является недостаточным и требуется описание на атомном или электронном уровне.

Современная физика кристаллов большое внимание уделяет роли макроскопических полей упругой деформации в кристаллах, оказывающих огромное (если не основное) влияние на характер роста областей новой фазы (Ройтбурд, 1975). Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наличие таких полей приводит к упругому взаимодействию этих областей, в результате чего при благоприятных условиях формируются упорядоченные ансамбли кристаллов или полидомешные области. Кристаллы образуют плоскостные образования, которые подобны полидомешной пластине, причем в качестве доменов служат не только области новой фазы, но и участки исходной. Структура полидомешной пластины или ансамбля кристаллов, форма и взаимное расположение областей новой фазы внутри ограниченной исходной фазы определяются минимумом свободной энергии.

Превратится ли эта область целиком в моно- или полидомешное образование новой фазы, или же в ней сохранится исходная фаза, зависит от термодинамических условий превращения, а также от формы и объема области. Исходная фаза оказывается стабилизированной вследствие стремления кристаллов, составляющих ансамбль, сохранить равновесную пластинчатую форму. Образование ансамбля плоскопараллельных пластин может оказаться энергетически выгодным, если снижение энергии макроскопического поля внутри фазы преобладает над увеличением свободной энергии образующихся поверхностей новой фазы. Возникшая многофазная система будет находиться в термодинамическом равновесии, которое, однако, может быть смещено (с изменением соотношения между фазами) за счет изменения температуры или внешних нагрузок.

Если стать на эту точку зрения, то не надо обладать слишком большой фантазией, чтобы в структуре железных метеоритов увидеть возникновение отдельных пластин и

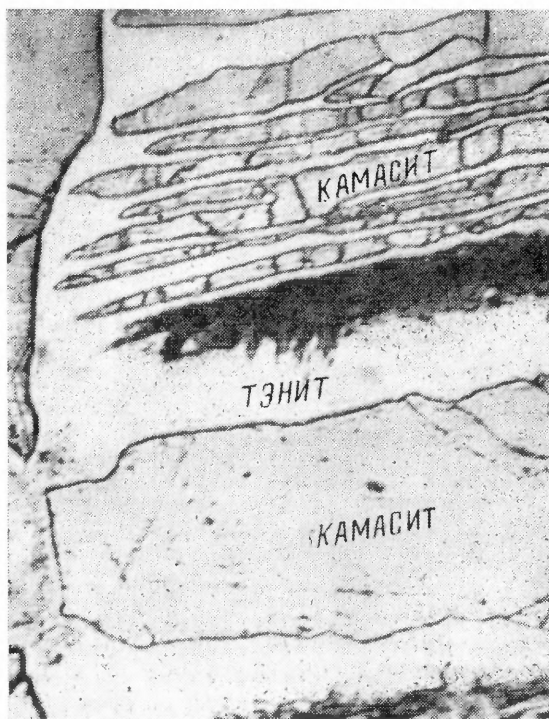


Рис. 61. Участок полированной и протравленной поверхности железного метеорита Эгвекинот. Ансамбль плоскопараллельных пластинок камасита, разделенных прослойками тэнита (вверху), и пластина камасита, которая могла получиться в результате слияния подобного ансамбля пластинок (внизу). (Увеличение 150 \times .)
Архив Комитета по метеоритам АН СССР.

целых ансамблей плоскопараллельных пластин, занимающих иногда большие области (рис. 61). При таком подходе к пониманию структур железных метеоритов пластины камасита можно рассматривать как слившиеся ансамбли (или части ансамблей) более тонких плоскопараллельных

пластинок. Не все такие ансамбли сливаются в пластины. Они частично сохраняются и известны в метеоритике под названием пертитовидного плессита. Следует обратить внимание на то, что сохранившиеся ансамбли тонких камаситовых пластинок, разделенных тэнитовыми прослойками, но толщине, как правило, не превышают «выросшие» камаситовые пластины.

При формировании структуры железных метеоритов через слияние ансамблей плоскопараллельных пластин распределение никеля в пластинах камасита и сохранившихся между ними слоях тэнита, вообще говоря, должно быть похоже на то, которое получится при спокойном медленном одностадийном росте камаситовых пластин. В самом деле, пикель, оказавшийся лишним в пластине камасита, образовавшейся слиянием ансамбля, устремится в окружающий тэнит, где никеля всегда не хватает, т. е. к границам пластины, и будет насыщать границы тэнитовых пластинок, примыкающие к камаситовым. Существенным является то, что диффузия никеля будет идти, хотя и при более низкой температуре, чем при одностадийном росте, но зато при больших отклоненных концентрации никеля от равновесных значений как в камасите, так и в тэните. Это должно частично компенсировать уменьшение скорости диффузии из-за уменьшения коэффициентов диффузии с уменьшением температуры. К сожалению, модельные расчеты, необходимые для более детального исследования вопроса, еще не проводились. Однако ясно, что эта точка зрения повлечет за собой отказ от малых скоростей остывания железных метеоритов и больших глубин их залегания в недрах первичных родительских тел.

Заметим, что рост тонких камаситовых пластин ансамбля может идти из тэнита по типу мартенситного превращения. Наши представления об особенностях подобных превращений в конце 70-х гг. претерпели серьезные изменения. Благодаря работам Г. В. Курдюмова и др. (1977) было выяснено, в частности, что кристаллическая решетка мартенсита (α_2 -фаза железа) является, вопреки сложившимся взглядам, бездефектной. Она отличается от решетки камасита (т. е. α -фазы) лишь небольшой, но постоянной степенью асимметрии ячеек, которые при нагревании могут превращаться в ячейки α -фазы.

Анализ характера превращений $\gamma \rightarrow \alpha$ в железе и сталях в лабораториях показал, что у зарождающейся и растущей области α_2 -фазы кристаллографические плоскости ориентированы по отношению к кристаллографическим плоскостям γ -фазы точно так же, как у α -фазы (§ 8). Но сила роста у растущей α_2 -фазы оказывается столь велика, что при достижении границ другого зерна (с иной ориентировкой кристаллографических плоскостей) γ -фазы и прорастания в него ориентировка кристаллографических плоскостей у α_2 -фазы сохраняется (оказываясь вследствие этого произвольной по отношению к кристаллографическим плоскостям γ -фазы второго зерна). В случае крупного монокристалла тэнита растущая α_2 -фаза на протяжении всего процесса роста, очевидно, должна сохранять ориентацию кристаллографических плоскостей по отношению к исходной γ -фазе, т. е. ту же самую, что и наблюдаемая в метеоритах взаимная ориентация γ - и α -фаз.

Вероятно, без отказа от привычных представлений об одностадийном росте камаситовых балок в медленно остывающих монокристаллах тэнита не удастся объяснить, например, сосуществование видманштеттеновых фигур железных метеоритов с включенными в них обломками хондритов или с включенными в них стеклами, в которых сохранились треки от космических лучей.

Конечно, предстоит еще объяснить и формирование крупных кристаллов тэнита. Мы плохо знаем условия роста монокристаллов никелистого железа в столь экзотических условиях, какие существовали на астероидах. Можно предположить, что ориентация кристаллографических плоскостей растущего монокристалла тэнита контролировалась внешними условиями, например, ударными воздействиями: для этих воздействий всегда существовало приблизительно одно и то же преимущественное направление — сверху вниз по отношению к поверхности астероида. Можно говорить о возможности слияния сосуществующих небольших по размерам кристаллов тэнита, сопровождающегося их перестройкой, в результате которой создавалась единая структура — монокристалл.

Доводами в пользу этого предположения могут служить:

1) существование зернистой структуры камаситовых пластин, которую можно рассматривать как реликтовую структуру танитовых зерен. Размеры зерен-реликтов в топкоструктурных октаэдритах часто превышают размеры камаситовых пластин, и их границы нередко тянутся из пластины в пластину;

2) существование плесситовых полей, лишенных октаэдриковой структуры.

Вряд ли логично искать разные механизмы формирования структуры железных метеоритов групп IA-IB и железо-каменных метеоритов, с одной стороны, и железных метеоритов других групп, для которых как будто ничто не мешает принять гипотезу медленного одностадийного остывания, с другой.

Итак, повторяющиеся ударные воздействия, сопровождающиеся подогревом вещества, облегчающим перестройку структуры, вероятно, могут представлять собой альтернативный механизм формирования многих особенностей структуры метеоритов разных классов. Особое преимущество такой альтернативы (которая, конечно, нуждается в проверке методами лабораторного и математического моделирования) заключается в том, что она снимает некоторые трудности, связанные с разогревом астероидов (§ 8), с их дифференциацией, а также с необходимостью катастрофических дроблений астероидов, при которых, с одной стороны, должно было обнажиться вещество, сформировавшееся в недрах, а с другой, — это вещество должно было в процессе дробления астероида сохранить свою структуру практически неизменной.

§ 10. Последние родительские тела метеоритов

Долгое время представление об астероидном происхождении метеоритов связывалось с предположением, что столкновения тел, движущихся в кольце астероидов, дают обломки, часть которых сразу же начинает двигаться по орбитам, на которых эти обломки имеют шансы встретить Землю, т. е. по орбитам, глубоко пропикающим во внутренние районы Солнечной системы и сближающимся с орбитой Земли. Подобные неверные указания можно встретить в литературе до сих пор.

Однако для того чтобы обломок астероида, движущегося в кольце астероидов, приобрел необходимую для сближений с Землей сильно эксцентричную орбиту с малым перигелийным расстоянием ($q \leq 1$ а. е.), его гелиоцентрическая скорость в момент образования при дроблении астероида должна измениться на ~ 6 км/сек. Между тем относительные скорости астероидов кольца, с которыми и происходят их столкновения, как уже говорилось в § 5, порядка 5 км/сек. Поскольку масса разлетающихся обломков на 1—2 порядка больше массы упавшего на астероид тела, в силу закона сохранения количества движения образующиеся обломки разлетаются со скоростями, на 1—2 порядка меньшими скорости столкнувшихся тел. Лишь у немногих обломков добавки к гелиоцентрической скорости достигают ~ 1 км/сек. Поэтому в дальнейшем обломки движутся по орбитам, сходным с орбитой родительского астероида.

Длительное возмущающее действие планет, вообще говоря, способно преобразовать орбиты, лежащие в кольце астероидов, в орбиты, сближающиеся с орбитой Земли, потому что в ходе «перемешивания» орбит астероидов планетные возмущения увеличивают дисперсию элементов их орбит. Но происходит это слишком медленно. Характерное время формирования орбит, сближающихся с орбитой Земли, оценивается во многие миллиарды лет. Эта оценка косвенно подтверждается тем, что при значительно меньшем характерном времени кольцо астероидов уже давно перестало бы существовать, рассеявшись по всей Солнечной системе. Поэтому типичный астероид кольца не может быть типичным последним родительским телом метеоритов.

Претенденты на роль последних родительских тел метеоритов. На роль последних родительских тел метеоритов могут претендовать лишь немногие астероиды. Дело в том, что почти все метеориты (за исключением железных) — это «свежие» обломки: их космический возраст, т. е. время самостоятельного движения в межпланетном пространстве после откола от последнего родительского тела, оценивается в $\sim 10^6$ — 10^7 лет (см. рис. 14). Это значит, что за столь короткое время должно было, во-первых, произойти преобразование орбиты обломка от орбиты, сходной с орбитой его последнего родительского тела

(по которой обломок начал двигаться после откола), до орбиты, пересекающей земную, и, во-вторых, вылавливание обломка Землей.

Поиски претендентов на роль последних родительских тел метеоритов долго были безуспешными. В 60—70-е гг. в кольце астероидов было выявлено всего несколько групп немногочисленных астероидов, движущихся по орбитам, способным испытывать сравнительно быстрое преобразование. Это астероиды, пересекающие орбиту Марса (Андерс, 1964), движущиеся вблизи соизмеримости $1 : 2$ с Юпитером (Циммерман и Везерилл, 1973) и на резонансных поверхностях в $a-e-i$ -пространстве (Вильямс, 1973). Однако и для этих астероидов характерное время преобразования орбит оценивается в $\sim 10^8$ лет, оказываясь неприемлемо большим для кандидатов в последние родительские тела большинства метеоритов.

В 60-х гг. привлекли к себе внимание в качестве возможных последних родительских тел метеоритов астероиды группы Аполлона. Характерное время вычерпывания Землей, или динамическое время жизни, этих астероидов ($\sim 10^7$ лет, § 6) по порядку величины совпадает с космическим возрастом большинства метеоритов. Поэтому напрашивался вывод, что в виде метеоритов на Землю падают обломки именно этих астероидов. Однако в те годы казалось, что такое представление об астероидах группы Аполлона, как о последних родительских телах метеоритов, наталкивается на несколько трудностей:

1. Согласно расчетам Дж. Везерилла и Дж. Вильямса (1968) получалось, что ожидаемый приток на Землю от немногих известных тогда астероидов группы Аполлона почти на три порядка меньше наблюдаемого притока метеоритов, который они принимали равным $\sim 10^9$ г/год на всю Землю.

В настоящее время эта трудность в значительной мере устранена. Во-первых, принимавшийся ранее приток метеоритов на Землю оказался, судя по данным, полученным с помощью болидных сетей, завышенным приблизительно на порядок (например, Цеплева, 1978).

Во-вторых, на роль последних родительских тел метеоритов наравне с астероидами группы Аполлона могут претендовать и астероиды группы Амура (Левин и Симоненко, 1977; Симоненко, 1977в). Хотя для типичных астерои-

дов группы Амура (на орбитах типа Эроса динамическое время жизни велико и согласно Везериллу (1975) составляет $\sim 2 \cdot 10^8$ лет, среди членов этой группы есть приближающиеся к орбите Земли на малые расстояния — вплоть до нескольких сотых а.е. Небольших скоростей разлета обломков ($100\text{—}200$ м/сек) при дроблении подобного астероида в районе афелия его орбиты (при движении в сравнительно плотных частях кольца астероидов) достаточно, чтобы перигелии орбит части обломков, образовавшихся при дроблении, оказались на орбите Земли или слегка внутри нее. Иногда это может произойти не сразу, а в результате дополнительного воздействия планетных возмущений.

В-третьих, следует учесть, что число членов групп Аполлона и Амура оценивается в настоящее время в $n \cdot 10^2\text{—}10^3$ (§ 6).

Отсутствие серьезного расхождения этого рода признал впоследствии и сам Везерилл.

2. Другая трудность связана с тем, что, поскольку средняя продолжительность жизни астероидов группы Аполлона (и Амура) невелика по сравнению с возрастом Солнечной системы, должно существовать непрерывное пополнение астероидов, входящих в состав этой группы. Кажется, что единственным астероидным источником пополнения могут быть астероиды на орбитах, скрещивающихся с орбитой Марса (Андерс, 1964). Но согласно Э. Эпику (1963) продуктивность этого источника в несколько раз меньше необходимой. Позднее было показано, что источником с большей, но все же недостаточной продуктивностью могут быть уже упоминавшиеся астероиды кольца, движущиеся вблизи соизмеримости 1:2 с Юпитером и на резонансных поверхностях в $a-e-i$ -пространстве.

Чтобы обойти трудности, связанные с поступлением вещества из кольца астероидов, Эпик (1963, 1965, 1966) выдвинул гипотезу о кометном происхождении большинства тел группы Аполлона. Согласно его оценкам кометный источник оказывался вполне достаточным для пополнения группы Аполлона.

Однако эта гипотеза наталкивалась на другую трудность. До сих пор остается неясным, что происходит с кометным ядром при испарении льдов. Теряются ли ле-

тучие вещества вместе с нелетучими, так что ядро полностью рассеивается в межпланетном пространстве, или же пелетучие вещества частично остаются на поверхности ядра, постепенно накапливаясь и формируя в конце концов каменистое астероидоподобное тело? Впрочем, если даже превращение кометных ядер в астероидоподобные тела и возможно и если оно действительно происходило на протяжении всего времени существования Солнечной системы, дав множество астероидоподобных тел, то все равно «астероиды», образовавшиеся таким путем, не могут быть родительскими телами подавляющего большинства метеоритов: у «кометных астероидов» наверняка нет источников энергии для разогрева их недр, необходимого для превращения рыхлого вещества, остающегося после испарения, в плотное прочное вещество метеоритов со всеми особенностями их структуры и химического состава.

Чтобы обойти трудности, связанные с кометным веществом, Эпик модифицировал ледяную модель Уиппла, предложив два альтернативных варианта строения кометных ядер. Один из них предполагал, что ледяные кометные ядра могут содержать каменные глыбы, являющиеся обломками астероидов, второй вариант предполагал двуслойное строение кометных ядер с каменным ядром и ледяной оболочкой.

Обе модели, предлагаемые Эником, представляются неприемлемыми (Андерс, 1975; Левин и Симоненко, 1977). Первая модель предполагает, что в кометные ядра успели войти обломки астероидов. Между тем время жизни кометных ядер на орбитах, скрещивающихся с орбитой Юпитера, до их выброса из планетной системы по оценке самого Эпика (1975) составляет $\sim 10^7$ лет. Часть астероидов действительно могла в течение даже столь короткого времени раздробиться в столкновениях, а их обломки могли вонзиться в холодные ледяные ядра комет до выброса последних в облако Оорта. Этот экзотический процесс мог породить редкие кометы, содержащие астероидные обломки. Но такие обломки не могут нести в себе следов того медленного и длительного остывания, которые наблюдаются в метеоритах и которые могли быть приобретены только в недрах астероидов.

Что касается двуслойной модели кометных ядер, то современные космогонические представления не дают

никаких указаний на возможность их образования. Для формирования таких ядер нужно было бы, чтобы на начальном этапе существования протопланетного облака в его внешней зоне была бы сравнительно высокая температура, допускающая существование лишь каменных частиц. Эта температура должна была бы сохраняться в течение всего того периода времени, пока каменные частицы объединялись в тела километровых или больших размеров. После этого должно было бы произойти остывание облака, конденсация льдов, а затем их аккумуляция на каменных телах. Искусственность этой схемы очевидна. Кроме того, она усугубляет и без того большие трудности, связанные с объяснением нагрева родительских тел, и создает трудности, связанные с сохранением при этом льдов.

Что же касается признаков пребывания в реголите родительских тел, то приобрести их метеоритному веществу в гипотезе кометных ядер, оказывается, негде.

Поэтому мы вынуждены отказаться от кометных ядер как кандидатов в родительские тела метеоритов. Единственными претендентами на роль последних родительских тел метеоритов остаются астероиды. Правда, многие исследователи (например, Вассон, 1974; Андерс, 1975) допускают, что «кометные астероиды» могут быть родительскими телами углистых метеоритов типа CI, не несут следов даже слабого нагрева. Но, скорее всего, кометные астероиды дают те рыхлые, непрочные тела, которые полностью разрушаются в атмосфере, порождая яркие болиды (см. ниже).

Трудности, связанные с пополнением групп Аполлона и Амура из астероидного источника, сохраняются и в настоящее время. Возможно, что большое число членов (как известных, так и неизвестных) этих групп удастся объяснить особым, резонансным характером их орбит (§ 6).

З. Дж. Везериллом (1975) была выявлена еще одна трудность. Модельные расчеты эволюции орбит тел на орбитах типа орбит астероидов групп Аполлона и Амура и их вычерпывания планетами земной группы показали, что у ансамбля тел, столкнувшихся с Землей (а следовательно, и у ансамбля метеоритов), в распределении космических возрастов должен существовать «хвост» с большими значениями возраста, который в действительности

у каменных метеоритов отсутствует. Эта трудность остается непреодоленной.

Сказанное выше относится к последним родительским телам каменных метеоритов с короткими космическими возрастaми. У железных метеоритов средний космический возраст оказывается по непонятным причинам на порядок больше, чем у каменных. Поэтому последними родительскими телами железных метеоритов могли, как будто, быть астероиды, движущиеся по быстро эволюционирующим орбитам в кольце астероидов или по орбитам, скрещивающимся с орбитой Марса. Правда, наблюдательные данные выявляют слабую тенденцию у железных метеоритов (и ахондритов) иметь систематически меньшие орбиты, чем орбиты хондритов и углистых метеоритов.

Нельзя исключить, что последними родительскими телами также и железных метеоритов являются астероиды групп Аполлона и Амура и что сами эти метеориты представляют собой уцелевшие остатки старых дроблений *).

Итак, если оставаться в рамках небесной механики, то можно заключить, что последние родительские тела, по крайней мере большинства метеоритов, — это тела, движущиеся по орбитам, скрещивающимся с орбитой Земли или приближающимся к ней, т. е. астероиды групп Аполлона и Амура.

Вопрос о том, насколько велика роль негравитационных эффектов в эволюции орбит метеоритов и мелких астероидов, исследован недостаточно. Эффект Ярковского—Радзиевского (§ 7) приводит к сокращению орбит у тел с обратным осевым вращением, и при периодах вращения, характерных для астероидов, может быть причиной перехода на орбиты, сближающиеся с орбитой Земли, мелких тел из кольца астероидов (Радзиевский, 1952; Петерсон, 1976). Железные метеориты дециметровых и метровых размеров могут совершить такой переход за несколько сотен миллионов лет, т. е. за время, согласующееся с космическим возрастом этих метеоритов. Каменные метеори-

*) Тщательный анализ содержаний космогенных изотопов в железном метеорите Сихота-Алинь позволил выявить следы двух дроблений — около 400 и 70 млн. лет назад (Колесников и др., 1974). Не исключено, что и в других железных метеоритах есть такие же, но еще не выявленные следы недавних дроблений, дающих «нормальный» космический возраст.

ты должны совершать этот переход быстрее из-за меньшей теплопроводности их вещества. Хотя характер орбит и ожидаемое распределение космических возрастов у таких метеоритов не исследовано, нельзя исключить, что по крайней мере некоторые метеориты достигают Земли под действием эффекта Ярковского — Радзиевского. Что же касается более крупных астероидов групп Аполлона и Амура, то в эволюции их орбит эффект Ярковского — Радзиевского большую роль играть не мог.

Метеоритообразующие астероидные обломки. Непредставительность метеоритных коллекций. Конусы сбора метеоритов. Далеко не каждый астероидный обломок, встретивший Землю, способен выжить во время полета в земной атмосфере и выпасть в виде метеорита (§ 1). Наибольшими шансами обладают плотные, прочные обломки метровых и дециметровых размеров, пропикшие в земную атмосферу со скоростями $v_0 < 22$ км/сек. Более мелкие и быстрые разрушаются в атмосфере полностью, превращаясь в тонкую пыль, которая медленно оседает на земную поверхность. Более крупные обломки не успевают потерять в атмосфере космическую скорость и, достигая поверхности Земли, образуют на ней метеоритный кратер или астроблему, причем чаще всего космическое вещество при этом оказывается полностью распыленным, и только специальные геохимические методы позволяют обнаружить в земных породах едва ощутимую примесь космического вещества (Апдерс, 1978). Лишь в редких случаях вокруг древних метеоритных кратеров находят разбросанные взрывом мелкие обломки метеорита (например, вокруг Аризонского кратера в США).

В земной атмосфере легко уцелели метеориты Лост Сити и Иннисфри, двигавшиеся по орбитам небольших размеров (рис. 62, табл. 5) и проникшие в атмосферу с большой скоростью — около 14 км/сек. Падение метеорита Лост Сити произошло 4 января 1970 г. на территории США и было сфотографировано камерами Прерийной сети. Падение метеорита Иннисфри случилось 5 февраля 1977 г. на территории Канады и было сфотографировано камерами Канадской болидной сети. Для обоих метеоритов по фотографиям были определены атмосферные траектории, скорости движения в атмосфере, начальные и конечные массы (по интенсивности свечения, характеризующей

интенсивность испарения метеоритного вещества, и изменению интенсивности свечения в сочетании с данными о скорости и торможении). При определении начальных масс использовались также результаты измерений содержания космогенных изотопов в метеоритном веществе. Сооставление результатов измерений этих содержаний с теоретическими кривыми изменений содержания этих изотопов в зависимости от глубины залегания исследуемого образца под поверхностью, облучаемой космическими лучами, позволило оценить толщину потерянного в атмосфере слоя вещества и таким образом оценить начальную массу.

Начальная масса Лост Сити оценивается в десятки или несколько сотен кг (Мак-Кроски и др., 1971), а метеорита Иннисфри — приблизительно в 15 кг (Холлидей, 1977). Массы, сохранившиеся к концу полета, оцениваются в ~ 25 и ~ 5 кг соответственно. Было найдено четыре осколка метеорита Лост Сити общей массой 17 кг и девять осколков метеорита Иннисфри общей массой 4,6 кг.

Огромную долю начальной массы потерял в атмосфере метеорит Пржибрам, выпавший 7 апреля 1959 г. на территории Чехословакии. Падение этого метеорита тоже было сфотографировано. Пржибрам проник в атмосферу Земли со скоростью 20,8 км/сек, близкой к верхнему пределу скорости входа в атмосферу метеоритообразующих астероидных обломков. Теми же методами начальная масса метеорита оценена в несколько тонн, а сохранившаяся к концу свечения — в несколько кг (Цеплеха, 1978). Было найдено 19 осколков метеорита общей массой 9,5 кг.

Все три метеорита являются хондритами со сходными прочностными свойствами, так что различие в скорости

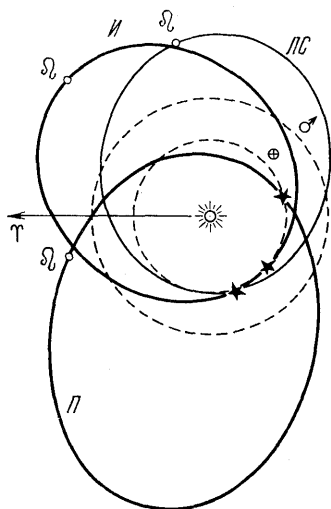


Рис. 62. Орбиты метеоритов Пржибрам, Лост Сити и Иннисфри.

Т а б л и ц а 5

Орбиты метеоритов с инструментально зарегистрированным падением

Метеорит	Элементы орбиты						
	a , а. е.	e	q , а. е.	q' , а. е.	i	ω	Ω
	1950,0						
Пржибрам	2,42	0,674	0,790	4,05	10,°4	241,°6	17,°1
Лост Сити	1,66	0,417	0,967	2,35	12,0	161,0	283,0
Иннисфри	1,77	0,443	0,986	2,56	11,8	178,0	317,0

входа в атмосферу является у них основным различием, определившим разные потери массы.

Еще более катастрофическим было разрушение тела, породившего болид Шумава, сфотографированный 4 декабря 1974 г. камерами Евронеийской болидной сети. Скорость его входа в атмосферу составляла 26 км/сек, что немного превышает верхний предел скорости входа в атмосферу метеоритообразующих тел. Начальная масса по интенсивности свечения болида (который был всего в 100 раз слабее Солнца и достигал -21^m) оценена в несколько сотен тонн (Цеплеха, 1978). Болид появился на высоте немного более 90 км, дал 15 ярких вспышек (из которых четыре были ослепительными) и исчез на высоте ~ 60 км, тогда как болиды, завершившиеся выпадением метеоритов, исчезали на высотах порядка 10—20 км. Конечная масса по оценке близка к нулю. Это значит, что к концу свечения болида вся масса космического обломка полностью испарилась. Можно думать, что сильная абляция этого обломка была связана не только с большой скоростью, но и с его малой механической прочностью.

Болидные сети позволили выявить многочисленный класс объектов, подобных тому, который породил болид Шумава. Существование таких малонрочных, рыхлых тел в межпланетном пространстве предполагалось уже давно (Левин, 1950). Они могут представлять собой плохо консолидированные обломки обычных астероидов или угасших кометных ядер, т. е. «кометных астероидов». Сами «кометные астероиды», если только они действительно существуют, вероятно, сходны с теми телами, которые являются

промежуточными между настоящими астероидами и кометными ядрами, а их обломки могут быть родственны углистым хондритам и являться их предшественниками в эволюционной последовательности. Ф. Уиппл (1968) условно называет их *до-углистыми метеоритами*, хотя в действительности подобные тела, по-видимому, никогда не достигают поверхности Земли в виде метеоритов: в атмосфере Земли они рассыпаются в мелкую пыль, порождая те болиды, исчезающие на аномально больших высотах порядка 60 км.

Тугоплавкие метеорные частицы кометного происхождения можно рассматривать как мельчайшие представители таких до-углистых тел. А. А. Явпель (1974), анализируя состав метеорных тел потока Драконид (образовавшегося в результате разрушения кометы Джакобини — Циннера), показал, что по соотношению основных элементов (Fe, Ca, Mg, Al) этот состав укладывается на последовательность, образуемую составами углистых метеоритов CI — CII — CIII, и является в этой последовательности крайним членом со стороны углистых метеоритов CI. Можно ожидать, что тот же состав имеют и «кометные астероиды», являющиеся, по существу, ничем иным, как скоплением нерассеявшихся метеорных тел.

Сказанное выше позволяет предполагать, что в наших коллекциях метеоритов представлены не все типы обломков, движущихся в межпланетном пространстве. Есть и более прямые указания на непредставительность метеоритных коллекций. С одной стороны, среди включений в метеоритах встречаются такие, которые не известны в качестве самостоятельных метеоритов. С другой стороны, как теперь известно, в кольце астероидов движутся тела, имеющие химический и минералогический состав, отличный от метеоритов всех видов.

Это значит, что в таблицах классификации метеоритов, предусматривающих весь набор протопланетных тел, сохранившихся со времени образования Солнечной системы до наших дней, должны иметься свободные клетки, а возможно, даже целые столбцы и строки, которые должны будут занять «метеориты», ныне еще не известные (Левин и Симоненко, 1977).

Существование верхнего предела скорости, прихода метеоритов в атмосферу приводит к тому, что метеорито-

образующими могут стать лишь те астероидные обломки, гелиоцентрические орбиты которых пройдут внутри конусов, охватывающих пучки орбит с одинаковыми скоростями входа в атмосферу v_0 (Симоненко, 1975). Угол раствора этих конусов, которые удобно называть *конусами сбора метеоритов*, тем больше чем больше v_0 . Примеры

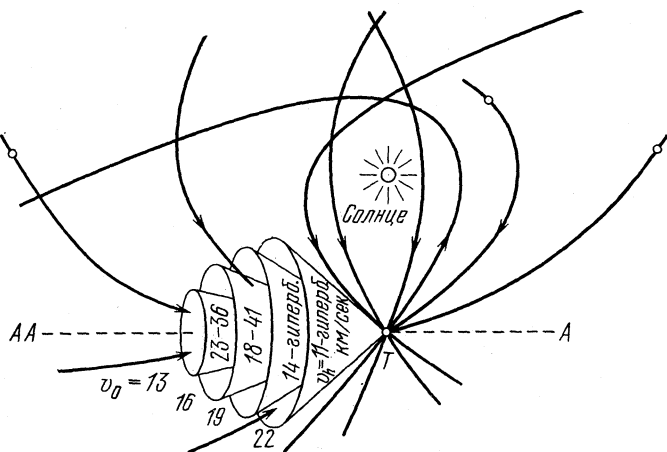


Рис. 63. Конусы сбора метеоритов при скорости входа в атмосферу Земли $v_0 = 13, 16, 19$ и 22 км/сек. Конусы жестко связаны с Землей (Т). Их оси совпадают с направлением апекс — антиапекс (А — АА). Штриховая линия — орбита Земли. Метеоритообразующими могут стать только тела, проникшие внутрь конусов сбора с гелиоцентрическими скоростями, указанными на образующих конусов (км/сек). Полости внутри конусов, соответствующие гиперболическим скоростям (*гиперб.*), на рисунке не показаны.

конусов сбора при $v_0 = 13, 16, 19$ и 22 км/сек показаны на рис. 63. При $v_0 = 11,2$ км/сек конус сбора вырождается в прямую. Астероидные обломки, движущиеся по орбитам, проходящим вне конусов сбора, имеют $v_0 > 22$ км/сек и из-за сильной абляции в атмосфере не могут быть представлены в наших коллекциях метеоритов. Судить о их существовании мы можем лишь па основании наблюдений порожденных ими ярких болидов.

Конусы сбора метеоритов охватывают очень небольшую долю полной сферы: всего 0,013 при $v_0 = 13$ км/сек, 0,039 при 16 км/сек, 0,072 при 19 км/сек и 0,115 при

22 км/сек. Более того, при $v_0 > 16$ км/сек внутри конусов сбора метеоритов, догоняющих Землю, появляется полость, соответствующая гиперболическим орбитам, которые целесообразно исключить из рассмотрения. Тогда окажется, что при $v_0 = 19$ км/сек вместо 0,072 останется телесный угол 0,055 в долях полной сферы, а при 22 км/сек вместо 0,115 — всего 0,073.

Если бы распределение векторов гелиоцентрических скоростей обломков, встречающихся с Землей, по направлению было бы изотропным, то приведенные телесные углы давали бы долю метеоритообразующих обломков в надающем на Землю потоке тел. В действительности векторы гелиоцентрической скорости обнаруживают резкую концентрацию к антианексному направлению, так что доля метеоритообразующих обломков больше, но насколько она велика, остается неясным.

Возможные последние родительские тела метеоритов среди известных астерондов групп Аполлона и Амура. Из-за существования у метеоритообразующих астероидных обломков верхнего предела скорости входа в атмосферу Земли далеко не все астероиды групп Аполлона и Амура могут быть последними родительскими телами метеоритов. Убедиться в этом можно, определив, с какими скоростями могут надать на Землю обломки этих астероидов.

Будем полагать, что орбиты обломков не сильно отличаются от орбит их родительских астероидов. Если принять, что орбита Земли круговая, то геоцентрическую скорость U_E тела, движущегося по орбите, пересекающей с орбитой Земли, в точке пересечения орбит можно определить из уравнения

$$U_E^2 = 3 - \frac{1}{a} - 2\sqrt{a(1-e^2)\cos^2 i}. \quad (6)$$

Сравнив формулу (6) с формулой (1, § 5), можно видеть, что третий член в правой части формулы (6) есть не что иное, как $4a^2C_1 = \text{const}$. Следовательно, чтобы вычислить U_E обломка (или самого астероида) в момент пересечения орбиты Земли, вовсе не обязательно знать значения e и i в тот же момент. В формулу (6) для этого достаточно подставить элементы современных, оскулирующих орбит, не пересекающихся в настоящее время с орбитой Земли, а

голько скрещивающихся с ней или только приближающихся к ней. Если в ходе свободных осцилляций орбита рассматриваемого тела пересечет орбиту Земли, то его геоцентрическая скорость будет приближенно равна вычисленной по формуле (6).

Наличие, кроме свободных, еще и вынужденных осцилляций, а также короткопериодических возмущений и возмущений при тесных сближениях с планетами, приводит к изменению U_E , но редко к существенному. Поэтому мы воспользуемся формулой (6) для оценочных расчетов U_E , целью которых является, как говорилось выше, поиск последних родительских тел метеоритов среди известных астероидов.

Так, с помощью формулы (6), иренебрегая небольшим различием между геоцентрическими скоростями обломков и их последних родительских тел, связанными с различием начальных орбит и различием последующей эволюции, мы оценили геоцентрические скорости гипотетических обломков астероидов групп Аполлона и Амура при встрече с Землей.

В формулу (6) подставлялись элементы оскулирующих орбит астероидов, приведенные в табл. 1. В большинстве случаев эти орбиты уже в ходе свободных осцилляций пересекают орбиту Земли. В тех случаях, когда этого не происходит, в элементы орбит вносились минимальные изменения, чтобы сделать такое пересечение возможным. (Такие изменения может обеспечить разлет обломков при дроблении астероидов в афелиях орбит со скоростями 100—200 м/сек.)

Вычисленные значения U_E для гипотетических обломков 48 астероидов и соответствующие им скорости v_0 , с которыми обломки, встретившись с Землей, войдут в ее атмосферу, приведены в табл. 6. Курсивом выделены случаи $v_0 > 22$ км/сек, когда выпадения метеоритов невозможны. На рис. 64 значения U_E и v_0 нанесены в зависимости от обратной величины большой полуоси орбиты.

Из табл. 6 видно, что лишь 2—3 астероида орбитальной группы I с перигелиями между орбитами Меркурия и Венеры (§ 6), а именно, Цербер, Аполлон и, быть может, Гермес, могут давать обломки с $v_0 < 22$ км/сек, способные выпадать в виде метеоритов, если они обладают достаточной механической прочностью. В группах II и III с пери-

гелиями между орбитами Венеры и Земли или слегка вне орбиты Земли, а также в группе IV с орбитами малых размеров давать метеориты способны все астероиды (при том же

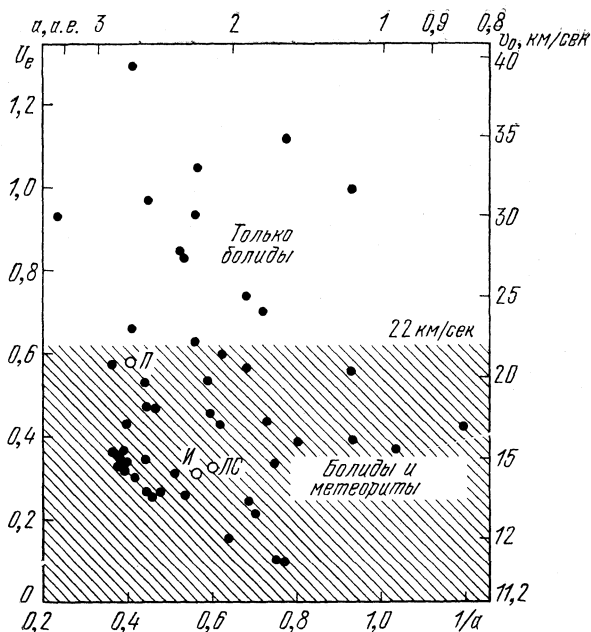


Рис. 64. Ожидаемые геоцентрические скорости U_E в единицах скорости Земли и скорости входа в атмосферу Земли v_0 (в км/сек) гипотетических обломков 48 известных астероидов групп Аполлона и Амура в момент встречи с Землей. Кружками отмечены данные для метеоритов Пржибрам, Лост Сити и Иннисфри.

условии к их механической прочности). В группе V с орбитами большого наклона нет ни одного астероида в кандидаты в последнее родительское тело метеоритов.

Для дальнейшего выяснения роли каждой из орбитальных групп I—IV в продуцировании метеоритов обратимся к анализу имеющихся сведений об орбитах метеоритов (Симоненко, 1975 и др.). Эти сведения для 51 метеорита были получены с использованием интервала возможных скоростей входа в атмосферу Земли метеори-

Т а б л и ц а 6

Скорости астероидов групп Аполлона и Амура
и их гипотетических обломков в момент встречи с Землей
(курсивом выделены астероиды, не способные давать
метеоритообразующие обломки)

Астероид	Группа	U_E км/сек	v_0 км/сек	Астероид	Группа	U_E км/сек	v_0 км/сек
<i>Икар</i>	—	29,7	31,7	1972 RB	III	7,6	13,3
<i>Адонис</i>	I	24,9	27,1	1953 NC	III	10,8	15,3
<i>2824-PL</i>	I	27,8	30,0	1949 SZ	III	3,1	11,6
<i>Дедал</i>	I	22,1	25,0	<i>Ивар</i>	III	7,7	13,4
<i>Цербер</i>	I	16,5	19,9	1972 RA	III	9,1	14,3
<i>Гермес</i>	I	18,9	21,9	<i>Эрос</i>	III	7,1	13,2
<i>Аполлон</i>	I	16,9	20,1	<i>Алинда</i>	III	9,4	14,5
<i>1977 HA</i>	II	18,0	21,2	<i>4788-PL</i>	III	10,0	14,9
<i>Торо</i>	II	13,0	17,2	<i>1936 UI</i>	III	4,6	12,0
<i>6743-PL</i>	II	12,9	17,1	<i>Альберт</i>	III	10,0	14,9
<i>Географ</i>	II	11,5	16,1	<i>Ганимед</i>	III	17,2	20,6
<i>1976 WA</i>	II	19,8	22,8	1977 RA	III	7,7	13,5
<i>1947 XC</i>	II	14	18	1963 UA	—	10,3	15,0
<i>1959 LM</i>	II	10	15	1916	—	10,2	15,0
<i>1950 DA</i>	II	13,7	17,8	1977 NB	IV	11,6	16,0
<i>Антиной</i>	III	16,0	19,6	1976 UA	IV	12,7	17,2
<i>6344-PL</i>	—	11,3	16,0	1976 AA	IV	11,0	15,7
<i>1960 UA</i>	III	7,8	13,4	<i>1974 MA</i>	V	31,2	33,0
<i>Кетцаль-коатль</i>	III	12,8	17,0	<i>1973 EA</i>	V	27,9	30,0
<i>Куйо</i>	III	14,1	18,1	<i>Сианф</i>	V	25,4	27,8
<i>1943</i>	III	6,3	12,9	<i>1973 NA</i>	V	38,6	40,0
<i>1946 SD</i>	III	3,1	11,6	<i>1975 YA</i>	V	33,5	35,4
<i>1950 LA</i>	III	16,0	19,6	<i>Бетулия</i>	V	29,1	31,1
<i>Амур</i>	III	9,3	14,5	<i>Ликь</i>	V	21,0	23,8

тообразующих тел $22 > v_0 > 11,2$ км/сек (§ 1). Так была выбрана область неопределенности для модуля вектора скорости. Видимый радиант, дающий ориентацию вектора скорости метеорита в атмосфере, определялся по атмосферной траектории метеорита, найденной из показаний очевидцев падения метеорита. Область неопределенности этого радианта принималась круговой с поперечником 20° .

На основании этого были определены области неопределенности элементов орбит и истинных радиантов (соответствующих вектору гелиоцентрической скорости) метеоритов. Расположение областей неопределенности истинных радиантов на небесной сфере показано на рис. 65

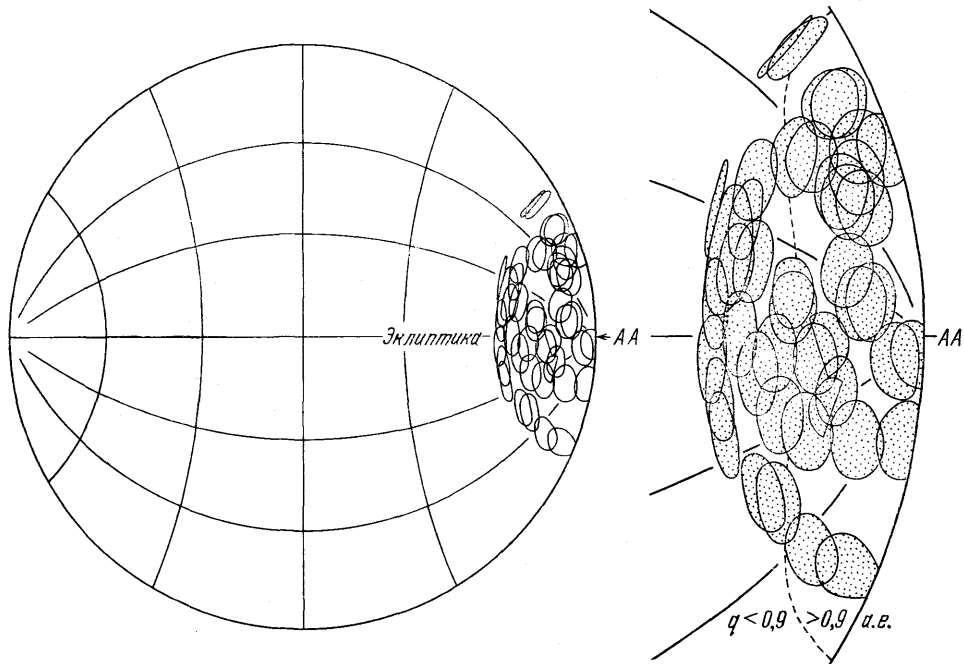


Рис. 65. Расположение областей неопределенности истинных радиантов метеоритов.

Истинные радианты метеоритов располагаются вблизи антиапекса AA , внутри области, ограниченной при той или иной предполагаемой скорости соответствующим этой скорости конусом сбора, и не удаляются от антиапекса более, чем на $30-40^\circ$ даже при максимальной возможной скорости $v_0 = 22$ км/сек. Это и означает, что перед встречей с Землей все метеориты двигались по орбитам малого или умеренного наклона с $i < 30-40^\circ$ в прямом направлении (ср. Ньютон, 1888).

Отсюда следует, что астероиды орбитальной группы V с большими наклонами не могут быть последними родительскими телами метеоритов. На рис. 65 справа показана область в окрестностях антиапекса в большем масштабе. Штриховая линия соответствует орбитам с $q = 0,9$ а. е. Приведен пример для $v_0 = 19$ км/сек. (Проекция Каврайского.)

Оказалось, что в большинстве случаев перигелийное расстояние орбиты метеорита слабо зависит от принятой скорости входа в атмосферу Земли. Это позволило указать довольно узкие интервалы q и проанализировать характер распределения q орбит метеоритов.

Большинство метеоритов (32 из 51) перед встречей с Землей двигались по орбитам с $q \geq 0,9$ а. е., т. е. лишь слегка проникающим внутрь орбиты Земли (рис. 64). Значение $q = 0,9$ а. е. лежит у внутренней границы люка Земли, из которого тела интенсивно вычерпываются Землей (§ 6). Метеориты на таких орбитах мы отнесем к орбитальной группе III (табл. 7). Это три углистых метеорита, 24 обыкновенных хондрита, два железных метеорита и один ахондрит аномального состава. Эти метеориты могут быть генетически связаны с астероидами группы III, хотя внутрь люка Земли могут, конечно, попадать и отдельные обломки астероидов других групп.

Менее $1/3$ метеоритов двигались по орбитам, сходным с орбитами групп I и II, более глубоко проникающим внутрь орбиты Земли.

К орбитальной группе I можно отнести пять метеоритов, а именно, два обыкновенных хондрита, один железный метеорит, один ахондрит и Тунгусский объект неизвестной природы. К группе II отнесем 10 метеоритов, а именно один углистый, семь обыкновенных хондритов и два ахондрита.

Распределение 51 метеорита по орбитам разных типов

Тип вещества		Группа орбит				
		I	II	III	IV	V
Угли- стые метео- риты	CI	—	Оргейл, CI1	Ревелсток, CI1	—	—
	CII	—	---	—	Мюррей, CII2	—
	CIII	—	—	Алледе, CIII3 Коруца, CIII4	—	—
Обыкновенные хондриты	LL	—	—	Апплей Бридж, LL6 Краенберг, LL5 Чикора, LL6	—	—
	L	Фармингтон, L5 Хмелевка, L5-6	Жемайткиемс, L6 Пис Ривер, L6 Вилна, L5-6	Брудергейм, L6 Бьорболе, L4 Иннисфри, L3-4 Кендлегон, L Киягня, L5 Кунашак, L6 Никольское, L4 Парагульд, L5 Первомайский пос., L6 Прамбакархен, L Сайнт Михель, L6 Страсмоур, L Тилден, L6 Хоумстед, L5	Моч, L6	—

Таблица 7 (продолжение)

Тип вещества		Группа орбит				
		I	II	III	IV	V
Обыкновенные хондриты	H	—	Венгеро, H4-5 Пржибрам, H5 Форест Сити, H5 Эрчи, H5	Джажала, H3 Лост Сити, H5 Орхус, H Пултуск, H5 Рочестер, H5 Симмерн, H Фаетвиль, H4-6 Штальдален, H5	Горловка, H3-4	—
Ахондриты		Пасамонте, Eu	Нортон Каунти, Au Снокс Каунти, Eu	Понтлифни, Аном.	Старое Песьяное, Au Вашугал, Но	—
Железные метеориты		Грашина, IID-Оm	—	Сихотэ-Алинский, IIВ-Оg-H Трейса, IIВ-Оm	—	—
Неклассифицированные		Тунгусский	—	—	—	—
Итого		5	10	31	5	—

Из трех метеоритов с орбитами, определенными по фотографическим данным, обыкновенный хондрит Пржибрам относится к группе II, а Лост Сити и Иннисфри — к группе III (табл. 7, 5 и рис. 62).

Радиационные возрасты метеоритов Пржибрам, Лост Сити и Иннисфри сравнительно велики (13,5, 5,5 и 25 млн. лет соответственно), и, следовательно, их орбиты могли значительно проэволюционировать со времени отделения метеоритов от их последних родительских тел. Тем не менее, весьма вероятно, что орбиты последних родительских тел этих метеоритов (если только они сохранились) принадлежат к орбитам того же типа, что и орбиты метеоритов.

Особого внимания заслуживает метеорит Фармингтон с весьма малой шириной зоны неопределенности орбиты в области перигелия (Андерс и др., 1976) и потому уверенно относимый к группе I. Этот метеорит имеет исключительно малый космический возраст (около 25 000 лет), который показывает, что орбита метеорита по форме и размерам едва ли успела сильно измениться под действием планетных возмущений и не утратила сходства с орбитой того астероида, обломком которого является Фармингтон. Это значит, что последним родительским телом метеорита Фармингтон является астероид группы I.

В связи с этим были предприняты специальные попытки найти последнее родительское тело метеорита среди астероидов группы I. Анализ размеров, формы и наклона орбит показал, что на роль последнего родительского тела Фармингтон могут претендовать пять астероидов (Левин и др., 1976; Симоненко и др., 1976). Позднее к ним было добавлено еще пять астероидов, открытых в 1976—1978 гг. Однако анализ вековых возмущений, накопившихся в течение времени, протекшего после отделения метеорита от его последнего родительского тела и проявившихся главным образом в изменении ориентации орбит, показал, что ни один из кандидатов в действительности не мог быть последним родительским телом метеорита Фармингтон, или, что то же, среди известных астероидов последнего родительского тела метеорита Фармингтон нет (Галибина и др., 1979).

Афелии орбит большинства метеоритов (46 из 51) располагаются за орбитой Марса. Пять остальных метеоритов

(около 10%) двигались по очень малым орбитам необычного типа с полуосью $a \lesssim 1$ а. е. и с афелиями внутри орбиты Марса или у самой орбиты Земли (Симоненко, 1975, 1977а, б). Они отнесены к группе IV. Области неопределенности этих орбит показаны на рис. 66.

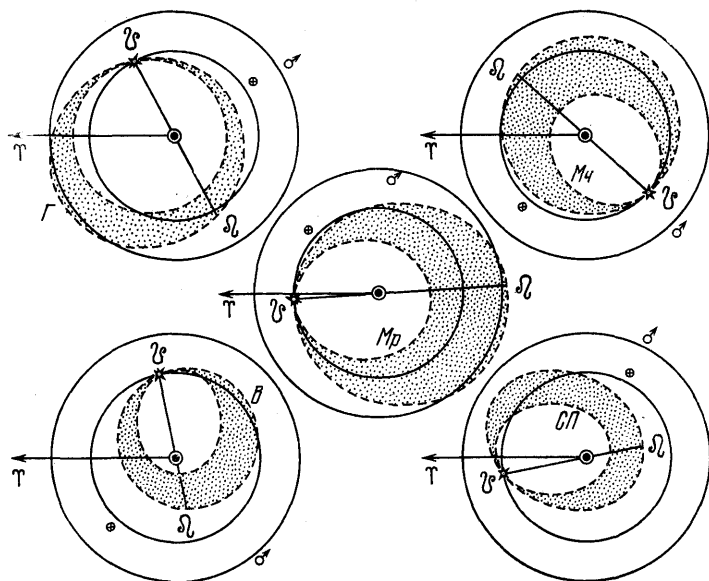


Рис. 66. Малые орбиты метеоритов Горловка, Моч, Мюррей, Вашугал и Старое Песьяное. Показаны области неопределенности орбит, соответствующие ошибкам в определении вектора скорости метеоритов.

Среди метеоритов, двигавшихся по малым орбитам, оказались один углистый метеорит, два обыкновенных хондрита и два ахондрита (см. табл. 7).

В табл. 7 приведено также общее число астероидов разных групп. Предполагая, что набор орбит астероидов и метеоритов достаточно репрезентативен, сравним продуктивность астероидов разных групп. Как видно из таблицы, большинство метеоритов (63%) дает группа III. Это объясняется как многочисленностью этой группы (42% астероидов), так и большей вероятностью вычерпывания ас-

тероидных обломков с орбит, перигелии которых лежат в люке Земли. Менее продуктивна группа II (17% астероидов, 20% метеоритов). Группа I (12% астероидов) дает всего около 10% метеоритов, очевидно, как из-за малой численности группы и меньшей вероятности встречи с обломками на таких орбитах, так и из-за большой геоцентрической скорости многих из них. Около 10% метеоритов дают немногочисленные астеронды группы IV.

Итак, данные об орбитах метеоритов показывают, что приток метеоритов на Землю дают главным образом астероиды группы Амура. Меньший вклад приходится на долю астероидов группы Аполлона. Более 20% астероидов обеих групп вовсе не могут давать метеориты.

Сравнение состава метеоритов и их последних родительских тел. Из табл. 7 видно, как метеориты разных минералогических классов представлены на орбитах разных тшпов. Заметны некоторые тенденции. Например, всего один ахондрит, да и то аномального состава, отнесенный к ахондритам условно, находится среди метеоритов наиболее многочисленной орбитальной группы III. Отсутствуют обыкновенные хондриты группы LL среди групп орбит I и II. Решить, являются ли замеченные тенденции реальными, а не результатом статистических флуктуаций, на имеющемся пока небольшом материале, к сожалению, не представляется возможным.

Сведения о составе поверхности астероидов групп Аполлона и Амура тоже скудны, и остается неясным, существует ли преобладание тел какого-либо состава в разных орбитальных группах.

Аналоги наиболее многочисленного класса метеоритов, — обыкновенных хондритов, — обнаружены среди астероидов групп Аполлона и Амура. Это согласуется с предположением, что именно среди этих астероидов должны находиться последние родительские тела метеоритов.

В кольце астероидов точных аналогов обыкновенных хондритов практически нет. В связи с этим Дж. Везерилл (1977) вернулся к предположению, что астероиды групп Аполлона и Амура — это уцелевшие остатки популяции протопланетных тел, образовавшихся в прошлом в области формирования планет земной группы, оставшиеся невычерпанными Землей и другими планетами земной группы в период роста последних из соответствующих им зон

питания. Это предположение высказывалось раньше Э. Эпиком (1963) на основании рассмотрения случайных планетных возмущений.

Возможность выживания тел на орбитах, сближающихся (и время от времени пересекающихся) с орбитой Земли и других планет земной группы на промежутках времени порядка возраста существования Солнечной системы совершенно невероятно, а между тем число тел на орбитах аполлоновского и амуровского типа в настоящее время велико и оценивается во многие сотни, если не тысячи (§ 6). Чтобы обойти эту трудность, Везерилл предполагает, что протопланетные тела под действием возмущений растущих планет выбрасывались во внутреннюю зону кольца астероидов, где и могли сохраниться на протяжении последующих 4,5 млрд. лет. Теперь же эта зона является одним из основных поставщиков астероидов групп Аполлона и Амура. Такой же механизм обеспечивает преобразование в астероиды групп Аполлона и Амура и тех тел, которые сформировались в кольце астероидов.

Причина особого состава астероидов групп Аполлона и Амура может заключаться и в другом. Астероиды этих групп — это, как неоднократно подчеркивалось, мелкие тела, размерами лишь в редких случаях превышающие 1 км. Но малый астероид, именно потому, что он мал, может не отражать средний состав родительского тела, обломком которого является. Поэтому нет ничего удивительного в том, что мелкие астероиды, приближающиеся к Земле, по составу их обнажившейся поверхности отличаются от крупных астероидов кольца. Состав же мелких тел кольца астероидов остается пока неизвестным.

Еще одной причиной различий состава мелких тел групп Аполлона и Амура, с одной стороны, и крупных астероидов кольца, с другой, может быть чистота поверхности первых и «загрязнение» вторых (Б. Цельнер и др., 1977 а): в отличие от малых астероидов групп Аполлона и Амура, которые не могут удержать даже тонкий слой реголита, крупные астероиды кольца припорошены, «загрязнены» веществом друг друга.

Подводя итоги, заметим, что астероиды групп Аполлона и Амура с уверенностью можно считать последними родительскими телами большинства метеоритов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы кратко ознакомились с историей изучения метеоритов и астероидов. В наши дни наука об этих малых членах Солнечной системы переживает качественный скачок. Сложившиеся представления о прошлом метеоритов и астероидов ломаются и заменяются новыми, но трудности, стоящие на пути решения проблемы происхождения метеоритов, остаются огромными. Мы коснулись лишь некоторых из этих трудностей и остановились на едва намеченных преснективах их преодоления. Есть основания надеяться, что в ближайшие годы на пути понимания прошлого метеоритов будут достигнуты существенные успехи.

Но как бы ни были велики успехи изучения метеоритов на Земле и астероидов с Земли, будущее, несомненно, принадлежит исследованиям с применением космических аппаратов. На примере изучения Луны, Марса, Венеры, Меркурия и Юпитера уже много раз можно было видеть, что результаты, полученные с помощью космических аппаратов, превзошли самые смелые предположения ученых и фантастов.

Проекты полетов к астероидам и на астероиды уже разрабатываются. Они предусматривают предварительное тщательное изучение наземными методами астероидов, приближающихся к Земле, а затем выбор астероидов, наиболее удобных для полетов к ним. Среди проектов обсуждаются беспилотные полеты с посадкой на астероид (например, на Эрос) с передачей на Землю телеметрической информации, и даже полеты, ставящие целью транспортировку небольшого астероида к Земле с переходом на околоземную орбиту. Сколько неожиданностей ждет нас на астероидах?

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Минералы метеоритов

- Аваруит, Ni_3Fe
Авгит, $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}, \text{Ti}, \text{Al})_2 [(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$
Алабандин, MnS
Алмаз, C
Альбит, $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
Альмандин, $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$
Андрадит, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]_3$
Анортит, $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$
Антигорит, $\text{Mg}_6(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$
Астраханит (блэдит), $\text{Na}_2\text{Mg}[\text{SO}_4]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Барринджерит, $(\text{Fe}, \text{Ni})_2\text{P}$
Битовнит, An_{70-90}
Брайенит, $\text{Na}_2\text{MgCa}[\text{PO}_4]_2$
Брайнерит (ферро-магнезит), $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{CO}_3$
Бржезинит, Cr_3S_4
Броизит, $(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Валлериит, CuFeS_2
Вевелит, $\text{Ca}[\text{C}_2\text{O}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$
Витлокит, $\text{Ca}_3[\text{PO}_4]_2$
Волластонит, $\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$
Вюртцит, $\beta\text{-ZnS}$
Вюстит*, FeO
Геленит, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
Гентнерит, $\text{Cu}_8\text{Fe}_3\text{Cr}_{11}\text{S}_{18}$
Герцинит (феррошинель), FeAl_2O_4
Гидроксилапатит, $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3 \cdot \text{OH}$
Гинерстен $(\text{Fe}, \text{Mg})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Гипс, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Горнонолит, $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$
Графит, C
Графтонит, $(\text{Fe}, \text{Mn})_3[\text{PO}_4]_2$
Гриналит, $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}) <_6 [(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$
Гроссуляр, $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$
Джерфишерит, $\text{K}_3(\text{Cu}, \text{Na})(\text{Fe}, \text{Ni})_{12}\text{S}_{14}$
Диопсид, $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Добреелит, FeCr_2S_4
Доломит, $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$
Железо, $\alpha\text{-Fe}$

- Ибобит** (гибонит, хибонит), $\text{Ca}_2(\text{AlTi})_{24}\text{O}_{38}$
Ильменит, FeTiO_3
Иоцит (аналог вюститита), FeO
Калиевый полевой шпат, $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
Кали-натровый полевой шпат, $(\text{K}, \text{Na}) [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
Кальцит, CaCO_3
Камасит, $\alpha\text{-(FeNi)}$
Карлсбергит, CrN
Кварц, SiO_2
Клинобронзит, $(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Клинопиперстен, $(\text{Fe}, \text{Mg})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Клинохризотил, $\text{Mg}_6[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$
Клиноэнстатит, $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Клифтонит (разновидность графита), C
Когепит (коэнит, аналог иск. цеменитита), $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$
Кордиерит, $\text{Mg}_2\text{Al}_3[\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$
Космохлор (юрипт), $\text{NaCr}[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Криноцит, $\text{NaMg}_2\text{CrSi}_3\text{O}_{10}$
Кристобалит, SiO_2
Кубанит, CuFe_2S_3
Куприт*, Cu_2O
Лабрадор, An_{50-70}
Лавренсит, $(\text{Fe}, \text{Ni})\text{Cl}_2$
Лонсдейлит (гексагональный алмаз), C
Магнезит, MgCO_3
Магнетит, Fe_3O_4
Маккиनावит, FeS
Маскелит, изотронизированный плагиоклаз; диаплектовое стекло полевошатового состава
Медь, Cu
Меджорит, $\text{Mg}_3(\text{Fe}, \text{Si}) [\text{SiO}_4]_3$
Мелилит, $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Al}) [(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_7]$
Меррилит
Меррихьюит, $(\text{K}, \text{Na})_2\text{Fe}_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
Метакамасит (метастабильная фаза), $\alpha_2\text{-(Fe}, \text{Ni)}$
Молибденит*, MoS_2
Монтichelлит, $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_4$
Монтморрилонит, $\text{Al}, \text{Mg} [(\text{OH})_2 | \text{Si}_4\text{O}_{10}]$
Муассанит, SiC
Неназванная сульфидная фаза, $(\text{Co}, \text{Ni})\text{S} - (\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})\text{S}$
Неназванный сульфид, $(\text{Fe}, \text{Zn}, \text{Mn})\text{S}$
Нефелин, $\text{Na} [\text{AlSiO}_4]$
Нининджерит (найнинджерит), $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{S}$
Оливин, $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$
Олигоклаз, An_{10-30}
Ольдгамит, CaS
Осборнит, TiN
Нальгорскит, $(\text{Mg}, \text{Al})_2[\text{OH} | \text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$
Панетит, $\text{Na}_2\text{Mg}_2[\text{PO}_4]_2$
Пентлангид $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$
Перовскит, CaTiO_3
Перриит, $(\text{Ni}, \text{Fe})_5(\text{Si}, \text{P})_2$

- Пижонит, $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$
 Пирит, FeS_2
 Пирротин (магнитный колчедан), Fe_{1-x}S
 Плагиоклаз, $n\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - m\text{CaAlSi}_2\text{O}_8$
 Раббит (разновидность шрейберзита), $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$
 Рёддерит, $(\text{Na}, \text{K})_2\text{Mg}_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
 Рёнит, $\text{CaMg}_2\text{Ti}[\text{Al}_2\text{SiO}_{10}]$
 Рингвудит, $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4 - \text{Si}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{O}_4$
 Рипидолит (ирохлорит), $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3[(\text{OH}) | \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}]/\text{Mg}_3\text{OH}_6$
 Рихтерит, $\text{Na}_2\text{CaMg}_5[(\text{OH}, \text{F})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}]$
 Рутил, TiO_2
 Саркозид, $(\text{Fe}, \text{Mn})_3[\text{PO}_4]_2$
 Септолит, $\text{Mg}_4[(\text{OH})_2 | \text{Si}_6\text{O}_{15}] \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}_2\text{O}$
 Сера, $\alpha\text{-S}$
 Синоит, $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$
 Содалит, $\text{Na}_4[\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}]\text{Cl}$
 Стекло силикатное
 Стенфилдит, $\text{Ca}_4\text{Mg}_3\text{Fe}_2[\text{PO}_4]_6$
 Сфалерит, $\alpha\text{-ZnS}$
 Титан — авгит (авгит с содержанием 3—5% TiO_2)
 Треворит*, NiFe_2O_4
 Тридимит (асманит), SiO_2
 Троилит, FeS
 Тэнит, $\gamma\text{-(Fe, Ni)}$
 Углеводороды
 Фассаит, $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$
 Ферроавгит, $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Na})(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Ti})[(\text{Al}, \text{Si})\text{O}_6]$
 Ферроалабандин, $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{S}$
 Фаррингтонит, $\text{Mg}_3[\text{PO}_4]_2$
 Фаялит, $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$
 Форстерит, $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$
 Хайдеит, $(\text{Fe}, \text{Cr})_{1+x}(\text{Ti}, \text{Fe})_2\text{S}_4$
 Халькопирит, CuFeS_2
 Халькопирротин, $\text{CuFeS}_2 - \text{FeS}$
 Хизлевудит, Ni_3S_2
 Хлор-апатит, $\text{Ca}_3[(\text{PO}_4)_3 | \text{Cl}]$
 Хром-диоксид (разновидность с $\text{Cr} > 0,5\%$)
 Хромит, FeCr_2O_4
 Хэксонит, $(\text{Fe}, \text{Ni})_{23}\text{C}_6$
 Циркон, $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$
 Чаоит (иолимоρφная модификация углерода), C
 Шамозит, $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3[(\text{OH})_2 | \text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$
 Шпиннель, MgAl_2O_4
 Шрейберзит, $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$
 Эпстатит, $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$
 Эpsilon-железо (метастабильная фаза), $\varepsilon\text{-(Fe, Ni)}$
 Эсомит, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
 Ягитт, $(\text{Na}, \text{K})_2\text{Mg}_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{30}$

Примечание. Список составлен Л. Г. Кваша (1976) на 1 января 1976 г. и дополнен минералами, открытыми позднее (отмечены звездочками). В список не включены минералы, образующиеся при

после метеорита в атмосфере и в процессе выветривания на Земле. Курсивом выделены названия минералов, не встречающихся на Земле.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Минералы в метеоритах разных классов

(по А. К. Лаврухиной и Г. В. Барышниковой, 1978)

1 — основные минералы, 2 — второстепенные, 3 — акцессорные минералы. В скобках указаны приблизительные содержания в % вес.

Углистые метеориты, CI: 1 — монтморрилонит и серпентин (50), сульфаты (18), углистое вещество (8), магнетит (20), вода (20); 2 — энсомит; 3 — сера, пирротин, шпинель, витлокит (?), гипс, астраханит, магнезит, брайперит, кальцит, доломит, шамозит, оливин.

Углистые метеориты, CII: 1 — серпентин или хлорит (шамозит) (45), оливин (45), углистое вещество (5), вода (4—18); 2 — клиноэнстатит, пирротин, кальцит; 3 — камасит, троилит, сера, пентлантид, шпинель, магнетит, гибонит, вевеллит, витлокит, гипс, клинохризотил.

Углистые метеориты, CIII: 1 — оливин, клиногиперстен, клиноэнстатит (75), углистое вещество (2), вода (до 2); 2 — пентлантид и троилит (5), пижонит, магнетит; 3 — камасит, аваруит, графит, медь, маккиनावит, хромит, шпинель, халькопирит, пирит, герцинит, перовскит, ибонит, треворит, витлокит, хлорапатит, энстатит, диоксид, авгит, ферроавгит, анортит, геленит, гроссуляр, нефелин, содалит, кордиерит, волластонит, андрадит, альмандин, ренит, молибденит.

Хондриты обыкновенные, LL: 1 — оливин (35—60), гиперстен и бронзит (25—35), камасит и тэнит (до 8); 2 — троилит (5), хромит, витлокит, илагиоклаз; 3 — медь, маккиनावит, халькопирротин, лавренсит, тридимит, ильменит, магнетит, рутил, иоцит, авгит, диоксид, нижонит, маскелинит, монтичеллит, рингвудит, хлорапатит, куирит, меррихьюит, меджорит.

Хондриты обыкновенные, L: 1 — оливин (35—60), гиперстен (и клиногиперстен) (25—35), камасит и тэнит (8); 2 — троилит (5), хромит, витлокит, илагиоклаз; 3 — медь, маккиनावит, халькопирротин, лавренсит, тридимит, ильменит, магнетит, рутил, иоцит, авгит, диоксид, нижонит, маскелинит, монтичеллит, рингвудит, хлорапатит, кунрит, меррихьюит, меджорит.

Хондриты обыкновенные, H: 1 — оливин (25—40), бронзит (и клинобронзит) (20—35), камасит и тэнит (16—21); 2 — троилит (5), хромит, витлокит, илагиоклаз; 3 — медь, маккиनावит, халькопирротин, лавренсит, тридимит, кристобалит, ильменит, магнетит, рутил, иоцит, авгит, диоксид, нижонит, маскелинит, монтичеллит, рингвудит.

Хондриты энстатитовые, E: 1 — энстатит и клиноэнстатит (40—60), камасит (17—28); 2 — троилит (до 7—15), илагиоклаз (до 5—10); 3 — медь, тэнит, графит, когенит, шрейберзит, перриит, осборнит, синоит, ольдгамит, добреелит, сфалерит, мак-

кинавит, ниингерит, алабадин, ферроалабадин, джерфшерит, халькопирротин, кварц, тридимит, кристобалит, хромит, магнетит, форстерит, рёддерит, рихтерит, диопсид, лавренсит.

Железные метеориты, октаэдриты: 1 — камасит и тэнит (98); 2 — троилит, шрейберзит, когенит; 3 — метакамасит, энсилон-железо, алмаз, графит, хэксонит, медь, карлсбергит, маккиनावит, сфалерит, бржезинанит, добреелит, халькопирротин, лавренсит, кварц, кристобалит, хромит, ферромагнетизальный алабадин, треворит, рутил, ильменит, магнетит, вюстит, саркопсид, графтонит, брайенит, нанетит, фаррингтонит, криновит, рёддерит, рихтерит.

Железные метеориты, гексаэдриты и бедные никелем атакситы: камасит (98), 2 — шрейберзит (и рабдит), троилит; 3 — добреелит, графит, когенит, хэксонит, космохлор, оливин (редко), нироксен (редко).

Железные метеориты, силикатные включения: 1 — форстерит, хромдиопсид, энстатит, бронзит, авгит, полевошпатовое стекло, альбитолигоклаз; 2 — калиевый полевой шпат, хлорапатит, витлокит, троилит, хромит, графит; 3 — аварунит, шрейберзит, добреелит, алабадин, клифтоит, когенит, медь, сфалерит, рутил, гентнерит, тридимит, ильменит, хизлевудит, джерфшерит, ягиит, космохлор.

Железные метеориты, богатые никелем атакситы: 1 — тэпит и камасит (98); 2 — шрейберзит, когенит, троилит, добреелит, хэксонит, графит.

Ахондриты, Au: 1 — энстатит (и клиноэнстатит) (87—90); 2 — форстерит (до 9), камасит, троилит, диопсид; 3 — медь, олигоклаз, шрейберзит, ольдгамит, нерриит, осборпит, добреелит, алабадин, джерфшерит, хайдеит, кварц, тридимит, ильменит, хромит.

Ахондриты, Di: 1 — гиперстен (98); 2 — битовнит, оливин; 3 — камасит, троилит, хромит, бронзит, диопсид.

Ахондриты, Ure: 1 — оливин (50—60), пижонит или бронзит (30), камасит (8—10); 2 — форстерит; 3 — алмаз (до 1—2), графит, чаоит, лонсдейлит, хромит, троилит.

Ахондриты, No: 1 — гиперстен и/или пижонит (40—80), битовнит — анортит (12—50); 2 — оливин (до 1); 3 — тридимит, кварц, кристобалит, камасит, троилит, апатит или витлокит, магнетит, хромит.

Ахондриты, Eu: 1 — нижонит (40—80), битовнит-анортит (12—50); 2 — оливин (до 1), гиперстен; 3 — тридимит, кварц, кристобалит, камасит, троилит, апатит или витлокит, магнетит, ильменит, хромит.

Железо-каменные метеориты, палласиты: 1 — оливин (45—70), камасит и тэнит (30—55); 2 — троилит (до 1); 3 — шрейберзит, когенит, графит, хромит, фаррингтонит, витлокит, стенфилдит, барринджерит, лавренсит, ильменит.

Железо-каменные метеориты, мезосидериты: 1 — камасит и тэнит (51), бронзит или гиперстен и битовнит или анортит (49); 2 — пижонит, оливин (до 1,5), троилит; 3 — авгит, витлокит, апатит, тридимит, циркон, шрейберзит, хромит, ильменит, рутил, диопсид.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Некоторые сведения о 360 астероидах

№	К	D, км	p	Q	№	К	D, км	p	Q
1	C	1003	0,054	3	47	C	158	0,027	1
2	U	608	0,074	3	48	C	250		
3	S	247	0,151	3	49	C	176		
4	U	538	0,229	3	51	C	151	0,050	2
5	S	117	0,140	3	52	C	289	0,035	2
6	S	201	0,164	3	53	C	97		
7	S	209	0,154	3	54	C	180	0,030	2
8	S	151	0,144	3	55	M	75		
9	S	151	0,139	3	56	C	146	0,026	3
10	C	450	0,041	3	57	S	109	0,14	1
11	S	150	0,126	3	58	C	110	0,03	1
12	S	126	0,114	2	61	S	87		
13	C	224	0,041	3	62	C	105		
14	S	158	0,162	3	63	S	91	0,128	3
15	S	272	0,155	2	64	E	56	0,342	2
16	M	250	0,093	3	65	C	309	0,022	2
17	S	109	0,103	2	66	C	85	0,029	1
18	S	150	0,144	3	67	S	58	0,157	1
19	C	215	0,032	3	68	S	126	0,126	2
20	S	131	0,164	3	69	U			
21	M	115	0,093	3	70	C	151	0,039	2
22	M	177	0,130	2	71	S	115	0,14	1
23	S	111	0,164	3	72	C	96	0,032	1
24	C	234	0,03	1	76	C	144		
25	S	72	0,184	2	77	S	67	0,113	1
26	S	93			78	C	140		
27	S	108	0,147	3	79	S	76	0,137	2
28	S	126	0,132	1	80	U	83	0,113	2
29	S	195	0,140	3	81	C	112		
30	S	91	0,144	3	82	S	65	0,138	2
31	C	370	0,03	1	83	C	123	0,03	1
32	S	93	0,14	1	84	C	90	0,037	2
34	C	111	0,039	1	85	C	147	0,042	2
36	C	118	0,024	1	86	C	108		
37	S	95	0,186	2	87	M	119		
39	S	163	0,169	3	88	C	210	0,045	2
40	S	100	0,123	3	89	S	155	0,086	2
41	C	204	0,056	2	90	C	124		
42	S	97	0,125	3	91	C	104	0,031	2
43	S	85	0,113	1	92	C	250		
44	E	82	0,377	2	93	C	168	0,039	2
45	C	226	0,030	2	94	C	188	0,029	2
46	C	133	0,028	2	95	C	230	0,019	1

Продолжение

№	К	D, км	p	Q	№	К	D, км	p	Q
97	M	95	0,121	2	163	C	76		
100	S	80			164	C	102		
102	C	85			166	U			
103	S	96	0,122	1	170	U			
104	C	122			172	S	67	0,082	2
105	C	126	0,036	1	173	C	142		
106	C	139	0,053	1	176	C	119		
107	C	211	0,037	1	177	C	68		
108	S	61			178	S	39		
109	C	75	0,053	2	179	S	72		
110	C	170			181	S	82		
111	C	143			182	S	39	0,212	1
113	S	47	0,208	2	183	S	33		
114	C	136	0,03	1	185	C	169		
115	S	93	0,129	2	186	M	49	0,104	2
116	S	80	0,166		189	M	41	0,109	2
117	C	137			192	S	94	0,165	3
119	S	57			194	C	191	0,027	2
120	C	173	0,034	2	195	C	92		
122	C	139			196	S	161	0,120	2
123	S	47	0,152	1	200	C	123		
124	S	67	0,147	2	203	C	92		
125	M	58			204	S	50	0,140	1
126	S	40			206	C	101		
129	M	115	0,187	2	208	S	42	0,136	2
130	U	173	0,050	1	209	M	67		
131	M	35	0,120	2	210	C	77		
135	M	78	0,108	2	211	C	166		
137	C	150	0,033	1	213	C	90		
139	C	163	0,040	2	214	M	44		
140	C	103	0,047	2	216	M	128		
141	C	133	0,028	2	219	S	39	0,126	1
144	C	130	0,043	2	221	U			
145	C	195	0,03	1	224	M	71	0,083	1
146	C	141	0,034	1	230	S	121	0,100	3
148	S	106			236	S	65		
149	O	16			238	C	154	0,029	2
150	C	109			241	C	200	0,030	1
151	S	41			247	C	142	0,031	3
152	S	64			250	M	107		
153	C	164			258	S	65		
154	C	191			264	S	63	0,127	2
156	C	104			268	C	106		
159	C	140	0,035	2	270	S	51	0,147	2
162	C	95			275	C	94		

Продолжение

№	К	D, км	p	Q	№	К	D, км	p	Q
276	C	107			409	C	211		
281	S	13			410	C	134	0,031	2
284	C	53			415	C	93	0,024	1
293	C	59			416	S	76	0,14	1
295	S	27			426	C	104		
306	S	43	0,14	1	432	S	55		
308	U	138	0,038	2	433	S	23	0,174	3
313	U	160	0,014	1	434	E	11	0,300	2
321	C	52			435	I			
324	C	246	0,032	3	441	M	66	0,146	2
326	C	80	0,038	1	444	C	165	0,027	1
335	U				446	O	40		
336	M	34			451	C	276	0,026	2
337	S	55			454	C	85		
338	M	60			455	C	105	0,029	1
342	C	53			462	S	37		
344	C	145			471	S	143	0,133	2
345	C	99	0,03	1	472	S	45		
349	O	144	0,260	2	476	C	113	0,032	1
350	C	123			478	S	75		
351	S	45			481	C	102		
354	S	153	0,148	2	497	M,	31	0,184	1
356	C	150	0,030	2	498	C	71	0,049	2
357	C	105			505	C	91		
360	C	130	0,034	2	508	C	126		
361	U				509	S	60		
362	C	90			510	M	34		
363	C	95			511	C	323	0,037	3
364	S	28	0,198	1	516	M	63	0,152	2
365	C	99	0,025	2	524	C	61		
367	S	20	0,14	1	532	S	243		3
370	I				537	C	136	0,021	1
372	I				540	S	19		
377	M	53			545	C	115		
381	C	126	0,028	2	550	S	53	0,084	1
384	S	36			554	C	101	0,039	1
386	C	191	0,040	2	558	M	64	0,082	2
387	S	112	0,127	2	560	C	43		
388	M	66			563	S	51	0,156	2
389	S	81	0,14	1	569	C	54		
393	C	129	0,044	2	579	S	76		
395	C	49			584	S	55	0,159	3
397	S	50	0,089	2	588	T	110		
402	S	46			591	M	23		
404	C	102	0,026	1	596	C	134	0,019	2

Продолжение

№	К	D, км	p	Q	№	К	D, км	p	Q
602	C	137	0,029	2	932	C	56		
617	T	147	0,037	1	946	C	47		
618	C	126			963	S	9,2		
623	C	35			969	U			
624	T	179	0,038	1	976	M	43		
631	S	49			977	C	68		
639	S	72			1001	M	38		
654	C	128	0,032	1	1011	S	7,2	0,156	2
658	S	24			1036	S	35		
660	S	51	0,086	1	1043	S	35		
661	S	36			1048	C	70		
674	S	102	0,14	1	1052	S	12	0,14	1
675	S	74			1058	S	13	0,14	1
676	C	71			1087	C	58		
679	S	73	0,146	2	1140	S	26		
680	I				1143	T	124		
694	C	101	0,028	1	1171	C	65		
702	C	205			1172	T	130	0,044	1
704	U	350	0,033	3	1173	T	92	0,034	1
705	I				1178	C	20	0,053	1
714	S	46			1212	C	69		
735	C	68			1263	I	24		
737	S	46	0,200	1	1266	C	79		
739	C	105			1268	C	91		
744	U				1287	S	19		
747	C	205	0,024	2	1291	S	26		
755	M	37			1314	S	8,5		
776	C	147			1329	S	24		
778	U				1362	C	58		
779	C	108			1401	S	10		
782	S	15	0,141	1	1437	T	126		
785	M	49	0,078	2	1500	S	7,0		
790	C	176	0,025	2	1504	S	13		
796	I				1547	U			
801	C	34			1566	O	1,4	0,166	1
804	C	141	0,048	1	1567	C	72	0,033	2
825	S	12			1580	C	6		
830	S	51	0,099	1	1583	T	109		
853	C	29			1588	T			
863	O	33	0,245	1	1620	S	3,4	0,181	1
887	S	4	0,166	2	1627	S	7,0		
888	S	36			1636	S	10		
911	T	155			1681	S	14		
924	C	78			1685	U	3,2	0,124	1

Окончание

№	K	D, км	p	Q	№	K	D, км	p	Q
1694	C	17			1960 UA	U			
1707	S	8,8			1976 AA	S	1,0		
1864	O	2,2			1978 CA	C	2	0,06	
1960 OA	S	15							

Примечания. В таблице указан номер астероида (№), его классификация по составу (K), диаметр (D), альbedo (p) и класс точности определения диаметра и альbedo (Q). Q = 3 соответствует наиболее надежным определениям. Курсивом выделены астероиды, приближающиеся к Земле (члены групп Аполлона и Амура).

ЛИТЕРАТУРА

- Адамс* (Adams J. B.), 1974; *J. Geophys. Res.*, v. 79, No. 32, 4829.
- Аллан и Джекобс* (Allan D. W. and Jacobs J. A.), 1956; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 9, No. 5-6, p. 256.
- Аллен* (Allen D. A.), 1970; *Nature*, v. 227, No. 5254, p. 158.
- Альвен* (Alfvén H.) 1969; *Astrophys. Space Sci.*, v. 4, p. 84.
- Андерс* (Anders E.), 1964; *Space Sci. Rev.*, v. 3, No. 5-6, p. 583.
- Андерс* (Anders E.), 1965; *Icarus*, v. 4, No. 4, p. 399.
- Андерс* (Anders E.), 1975; *Icarus*, v. 24, No. 3, p. 363.
- Андерсон и др.* (Anderson L., Gradie J., Zellner B.), 1976; *Bull. Amer. Astron. Soc.*, v. 8, p. 464.
- Аренс* (Ahrens T. J.), 1975; *The Moon*, v. 14, No. 2, p. 291.
- Арнольд* (Arnold J. R.), 1969; *Astron. J.*, v. 74, No. 10, p. 1235.
- Аррениус и др.* (Arrhenius G., Asunmaa S. K., Fitzgerald R. W., Kotahari B. K., Macdougall D.), 1974; *Meteoritics*, v. 9, No. 4, p. 313.
- Банч и др.* (Bunch T. E., Keil K., Olsen E.), 1970; *Contrib. to Mineralogy and Petrology*, v. 25, No. 4, p. 297.
- Барнет и Вассербург* (Burnett D. S. and Wasserburg G. J.), 1967; *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 2, No. 3, p. 167.
- Бернас и др.* (Bernas R., Gradsztajn E., Reeves H., Schatzman E.), 1967; *Ann. Phys. (N. Y.)*, v. 44, No. 3, p. 246.
- Бинс* (Binns R. A.), 1967; *Science*, v. 156, No. 3779, p. 1222.
- Боуэлл* (Bowell E. T.), 1977; *Abstr. 8th Annual Meeting of Amer. Astron. Soc.*, 19—22 Jan. 1977, Honolulu, Hawaii, p. 20.
- Боуэлл и Цельнер* (Bowell E. and Zellner B.), 1974; In: *Planets, stars and nebulae studies by photopolarimetry*/Ed. T. Gehrels.—Tucson: Univ. of Arizona Press, p. 381.
- Боуэлл и др.* (Bowell E., Dollfus A., Greake J. E.), 1972; *Proc. Third Lunar Sci. Conf.*, v. 3, p. 3103.
- Боуэлл и др.* (Bowell E. T., Clark R., Chapman C. R., Gradie J. C., Morrison D., Zellner B.), 1978; *Icarus*, v. 35, No. 3, p. 313.
- Бухвальд* (Buchwald V. F.), 1967; *Analecta Geologica*, No. 2, p. 3.
- Бухвальд* (Buchwald V. F.), 1971; *Meteoritics*, v. 6, No. 1, p. 27.
- Вайдорн* (Widorn T.), 1967; *Ann. Univ-Sternw. Wien*, B. 27, No. 2-4, S. 112.
- Вайсман и Везерилл* (Weissman P. R. and Wetherill G. W.), 1974; *Astron. J.*, v. 79, No. 3, p. 404.
- Ван Хоутен* (Van Houten C. J.), 1971; In: *Physical Studies of Minor Planets*/Ed. T. Gehrels.—Wash.: NASA, p. 183.
- Ван Хоутен и др.* (Van Houten C. J., Van Houten-Groeneveld J., Herget P., Gehrels T.), 1970a; *Astron. Astrophys. Suppl.*, v. 2, No. 5, p. 339.

- Ван Хоутен* и др. (Van Houten C. J., Van Houten-Groeneveld J., Gehrels T.), 1970b. *Astron. J.*, v. 75, No. 5, p. 659.
- Вассон* (Wasson J. T.), 1970a; *Icarus*, v. 12, No. 3, p. 407.
- Вассон* (Wasson J. T.), 1970b; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 34, No. 9, p. 957.
- Вассон* (Wasson J. T.), 1972; In: *Congr. Géol. Intern. 24^e Sess.*, Montreal, 1972, v. 15.— Gardenvale, Que.: Harpel's press, p. 161.
- Вассон* (Wasson J. T.), 1974; *Meteorites*. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag, 316 p.
- Вассон* (Wasson J. T.), 1975; *Abstr. 6th Annual Meeting of Amer. Astron. Soc.*, 17—21 Feb. 1975, Columbia, Maryland, p. 10.
- Веверка* (Weverka J.), 1974; In: *Physical Studies of Minor Planets/Ed. T. Gehrels*.— Wash.: NASA, p. 91.
- Веверка и Ноланд* (Weverka J. and Noland M.), 1973; *Icarus*, v. 19, No. 2, p. 230.
- Везерилл* (Wetherill G. W.), 1968; In: *Origin and Distribution of the Elements*.— Oxford a. o.: Pergamon Press, p. 423.
- Везерилл*, 1975; В кн.: *Космохимия Луны и планет*.— М.: Наука, с. 411.
- Везерилл* (Wetherill G. W.), 1977; In: *Proc. 8th Lunar Sci. Conf.*— New York: Pergamon Press, v. 1, p. 1.
- Везерилл и Вильямс* (Wetherill G. W. and Williams J. G.), 1968; *J. Geophys. Res.*, v. 73, No. 2, p. 635.
- Венке* (Wänke H.), 1965; *Z. Naturforsch.*, Bd. 20a, No. 7, S. 946.
- Венке* и др. (Wänke H., Baddenhausen H., Palme H., Spettel B.), 1974; *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 23, No. 1, p. 1.
- Вилкенинг и Клайтон* (Wilkening L. L. and Clayton R. N.), 1974; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 38, No. 6, p. 937.
- Вилкенинг и Андерс* (Wilkening L. L. and Anders E.), 1975; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 39, No. 9, p. 1205.
- Виллис и Вассон* (Willis J. and Wasson J.), 1978a; *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 40, No. 2, p. 141.
- Виллис и Вассон* (Willis J. and Wasson J.), 1978b; *Ibid.*, p. 162.
- Вильямс* (Williams J. G.), 1971; In: *Physical Studies of Minor Planets/Ed. T. Gehrels*.— Wash.: NASA, p. 177.
- Вильямс* (Williams J. G.), 1973; *Trans. Amer. Geophys. Union*, v. 54, No. 4, p. 233.
- Вильямс и Везерилл* (Williams J. G. and Wetherill G. W.), 1973; *Astron. J.*, v. 78, No. 6, p. 510.
- Вуд* (Wood J. A.), 1963; In: *The Moon, Meteorites and Comets/Eds G. P. Kuiper and B. Middlerhurst*.— Chicago: Univ. of Chicago Press, p. 337.
- Вуд* (Wood J. A.), 1964; *Icarus*, v. 3, No. 5—6, p. 429.
- Вуд* (Wood J. A.), 1965; *Nature*, v. 208, No. 5015, p. 1058.
- Вуд* (Wood J. A.), 1967; *Icarus*, v. 6, No. 1, p. 1.
- Вуд*, 1971; *Метеориты и происхождение Солнечной системы*.— М.: Мир., 173 с.
- Галибина И. В., Симоненко А. Н., Левин Б. Ю.*, 1979; *Письма в Астрон. ж.*, в печати.
- Галибина И. В., Симоненко А. Н., Левин Б. Ю.*, 1980; *Метеоритика*, в печати.

- Галибина И. В., Симоненко А. Н., 1981; Метеоритика, в печати.
- Гатлей и др. (Gatley J., Kiffer H., Miner E., Neugebauer G.), 1974; *Astrophys. J.*, v. 190, No. 2, part 1, p. 497.
- Гаффей (Gaffey M. J.), 1976; *J. Geophys. Res.*, v. 81, No. 5, p. 905.
- Гаффей и Мак-Корд (Gaffey M. J. and McCord T. B.), 1977; *Abstr. 8th Annual Meeting of Amer. Astron. Soc.*, 19—22 Jan. 1977, Honolulu, Hawaii, p. 20.
- Герелс Т., 1974; В кн.: *Планеты и спутники.*— М.: Мир, гл. 6, с. 367.
- Герелс (Gehrels T.), 1979; In: *Trans. Intern. Astron. Union*, In press.
- Герелс и др. (Gehrels T., Coffeen T., Owings D.), 1964; *Astron. J.*, v. 69, No. 10, p. 826.
- Герлинг Э. К. и Левский Л. К., 1956а; *ДАН СССР*, т. 110, № 5, с. 750.
- Герлинг Э. К. и Левский Л. К., 1956б; *Геохимия*, № 7, с. 59.
- Голдстейн (Goldstein J. I.), 1965; *J. Geophys. Res.*, v. 70, No. 24, p. 6223.
- Голдстейн (Goldstein J. I.), 1977; *Meteoritics*, v. 12, No. 3, p. 293.
- Голдстейн и Огилви (Goldstein J. I. and Ogilvie R. E.), 1965; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 29, No. 8, p. 893.
- Голдстейн и Шорт (Goldstein J. I. and Short J. M.), 1967; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 31, No. 6, p. 1001.
- Гоулт и др. (Gault D. E., Shoemaker E. M., Moore H. J.), 1963; *NASA Techn. Note D-1767*.
- Грей и Компстон (Gray C. M. and Compston W.), 1974; *Nature*, v. 251, No. 5475, p. 495.
- Даниельсон и Ип (Danielsson L. and Ip W.-H.), 1972; *Science*, v. 176, No. 4037, p. 906.
- Данлап (Dunlap J. L.), 1971; In: *Physical Studies of Minor Planets/ Ed. T. Gehrels.*— Wash.: NASA, p. 147.
- Дандон и Хафнер (Dundon R. W. and Hafner S. S.), 1971; *Science*, v. 174, No. 4009, p. 581.
- Джонс и Моррисон (Jones T. J. and Morrison D.), 1974; *Astron. J.*, v. 79, No. 8, p. 892.
- Джонсон и др. (Johnson T. V., Matson D. L., Veeder G. J., Loer S. L.), 1975; *Astrophys. J.*, v. 197, No. 2, part 1, p. 527.
- Дольфус (Dollfus A.), 1971; In: *Physical Studies of Minor Planets/ Ed. T. Gehrels.*— Wash.: NASA, p. 25.
- Дьюк и Силвер (Duke M. B. and Silver L. T.), 1967; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 31, No. 10, p. 1637.
- Дьяконова М. Н. и Харитонова В. Я., 1964; *Метеоритика*, вып. 24, с. 37.
- Дю Френ и Андерс (Du Fresne E. R. and Anders E.), 1962; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 26, No. 2, p. 251.
- Заварицкий А. Н. и Кваша Л. Г., 1952; *Метеориты СССР.*— М.: Изд.-во АН СССР, 245 с.
- Зюсс и др. (Suess H. E., Wänke H., Wlotzka F.), 1964; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 28, No. 5, p. 595.
- Камерон и Пайн (Cameron A. G. W. and Pine M. R.), 1973; *Icarus*, v. 18, No. 3, p. 377.
- Кашкаров Л. Л., Короткога Н. Н., Лаврухина А. К., 1975; *ДАН СССР*, т. 224, № 1, с. 198,

- Кваша Л. Г.*, 1916; *Метеоритика*, вып. 35, с. 136.
- Кларк и др.* (Clarke W. B., DeLaeter J. R., Schwarcz H. P., Shane K. C.), 1970; *J. Geophys. Res.*, v. 75, No. 2, p. 448.
- Койпер* (Kuiper G. P.), 1951; *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.*, v. 37, p. 717.
- Колесников Е. М., Лаврухина А. К., Левский Л. К., Фисенко А. В.*, 1974; *Метеоритика*, вып. 33, с. 105.
- Кресак* (Kresák Ľ.), 1977; *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, v. 28, No. 2, p. 65.
- Кресак* (Kresák Ľ.), 1978; *Ibid.*, v. 29, No. 3, p. 149.
- Кринов Е. Л.*, 1955; *Основы метеоритики*.— М.: Гостехиздат, 392 с.
- Кринов Е. Л.*, 1963; *Вестники Вселенной*.— М.: Географгиз, 144 с.
- Крукшанк* (Cruikshank D. P.), 1977; *Icarus*, v. 30, No. 1, p. 224.
- Крукшанк и Моррисон* (Cruikshank D. P. and Morrison D.), 1973; *Icarus*, v. 20, No 4, p. 477.
- Курат и др.* (Kurat G., Keil K., Prinz M.), 1974; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 38, No. 7, p. 1133.
- Курдюмов Г. В.* (Kurdjumov G.), 1933; *Trans. AIME*, v. 105, p. 253.
- Курдюмов и Закс* (Kurdjumov G. and Sachs G.), 1930; *Z. Physik*, B. 64, S. 325.
- Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И.*, 1977; *Превращения в железе и стали*.— М.: Наука, 238 с.
- Лаврухина А. К. и Барышникова Г. В.*, 1978; *Заниски Минералог. о-ва*, т. 107, вып. 4, с. 416.
- Лаврухина А. К., Устинов Г. К., Симоненко А. Н.*, 1972; *Метеоритика*, вып. 31, с. 24.
- Ларсон и Финк* (Larson H. P. and Fink U.), 1975, *Icarus*, v. 26, No. 4, p. 420.
- Лебовский* (Lebofsky L.), 1978; *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 182, p. 17.
- Левин Б. Ю.*, 1946; *Астрон. ж.*, т. 23, вып. 2, с. 83.
- Левин Б. Ю.*, 1949; *Природа*, № 10, с. 3.
- Левин Б. Ю.*, 1950; *Метеоритика*, вып. 7, с. 113.
- Левин Б. Ю.*, 1956; *Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе*.— М.: Изд-во АН СССР, 293 с.
- Левин Б. Ю.*, 1959; *Метеоритика*, вып. 17, с. 55.
- Левин Б. Ю.*, 1962; *Астрон. ж.*, т. 39, вып. 4, с. 763.
- Левин Б. Ю.* (Levin B. J.), 1964; *Nature*, v. 204, No. 4962, p. 946.
- Левин Б. Ю.* (Levin B. J.), 1965; *Успехи физ. наук*, т. 86, № 1, с. 41; *Planet. Space Sci.*, v. 13, No. 3, p. 243.
- Левин Б. Ю.* (Levin B. J.), 1969; In: *Meteorite Research/Ed. P. M. Millman*.— Dordrecht: Reidel Publ. Co., p. 16.
- Левин Б. Ю.* (Levin B. J.), 1973; *Метеоритика*, вып. 32, с. 37; см. также: 1974; In: *Asteroids, Comet, Meteoric Matter. Editura Academiei Republicii Socialiste România*, p. 101.
- Левин Б. Ю.* (Levin B. J.) 1977; In: *Comets, Asteroids, Meteorites. Interrelations, evolution and origins/Ed. A. H. Delsemme*.— Toledo: Univ. of Toledo, p. 307.
- Левин Б. Ю. и Маева С. В.*, 1972; *Метеоритика*, вып. 31, с. 18.
- Левин Б. Ю. и Симоненко А. Н.* (Levin B. J. and Simonenko A. N.), 1969; In: *Meteorite Research/Ed. P. M. Millman*.— Dordrecht: Reidel Publ. Co., p. 552.

- Левин Б. Ю. и Симоненко А. П.*, 1974; *Метеоритика*, вып. 33, с. 157
Левин Б. Ю. и Симоненко А. Н., 1977; *Метеоритика*, вып. 36, с. 3.
Левин и др. (Levin B. J., Simonenko A. N., Anders E.), 1976; *Icarus*, v. 28, No. 3, p. 307.
- Ли и Папанастассио* (Lee T. and Papanastassiou D. A.), 1974; *Geophys. Res. Lett.*, v. 1, No. 6, p. 225.
- Ли* и др. (Lee T., Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J.), 1976; *Geophys. Res. Lett.*, v. 3, No. 2, p. 109.
- Ли* и др. (Lee T., Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J.), 1978; *Astrophys. J. Lett.*, v. 220, No. 1, p. L21.
- Лидов М. Л.*, 1964; *Искусственные спутники Земли*, вып. 8, с. 5.
Лидов М. Л. и Ярская М. В., 1974; *Космические иссл.*, т. 12, № 5, с. 429.
- Любимова Е. А., Старкова А. Г.*, 1954; *Астрон. ж.*, т. 31, вып. 5, с. 429.
- Маева С. В.*, 1959; *Изв. Комиссии по физике планет*, вып. 1, с. 105.
Маева С. В., 1963; *Изв. Комиссии по физике планет*, вып. 4, с. 40.
- Мак-Колл* (McCall J. G. H.), 1973; *Meteorites and their origins.*— Newton Abbot: David and Charles (Houldings), 352 p.
- Мак-Корд и Гаффей* (McCord T. B. and Gaffey M. J.), 1974; *Science*, v. 186, No. 4161, p. 352.
- Мак-Корд и Чепмен* (McCord T. B. and Chapman C. R.), 1975a; *Astrophys. J.*, v. 195, No. 2, part 1, p. 553.
- Мак-Корд и Чепмен* (McCord T. B. and Chapman C. R.), 1975b; *Astrophys. J.*, v. 197, No. 3, part 1, p. 781.
- Мак-Корд* и др. (McCord T. B., Adams J. B., Johnson T. V.), 1970; *Science*, v. 168, No. 3938, p. 1445.
- Мак-Кроски* и др. (McCrosky R. E., Posen A., Schwartz G., Shao C. Y.), 1974; *SAO Spec. Rept*, No. 336.
- Мак-Кроски Р. Е., Шао Ц.-И., Позен А.*, 1978; *Метеоритика*, вып. 37, с. 44.
- Мак-Фаден* и др. (McFadden L. A., McCord T. B., Pieters C.), 1977; *Icarus*, v. 31, No. 4, p. 439.
- Мальшева Т. В.*, 1975; *Эффект Мёссбауэра в геохимии и космохимии.*— М.: Наука, 166 с.
- Марвин* (Marvin U. B.), 1962; *Nature*, v. 196, No. 4855, p. 634.
- Марсден* (Marsden B. G.), 1975; *Minor Planets Circ.*, No. 3814.
- Марсден и Вильямс* (Marsden B. G. and Williams J. G.), 1977; *Icarus*, v. 31, No. 4, p. 420.
- Мартьянов Д. Я.*, 1979; *Курс общей астрофизики.*— М.: Наука, 640 с.
- Матсон* (Matson D. L.), 1974; In: *Physical Studies of Minor Planets/* Ed. T. Gehrels.— Wash.: NASA, p. 45.
- Матсон* (Matson D. L.), 1975; *Abstr. 6th Annual Meeting of Amer. Astron. Soc.*, 17—21 Feb. 1975, Columbia, Maryland, p. 17.
- Мейсон* (Mason B.), 1967; *Mineral. Mag.*, v. 36, No. 227, S. 120.
- Миллман* (Millman P. M.), 1976; *Sky and Tel.*, v. 51, No. 4, p. 225.
- Морен и Голдстейн* (Moren A. E. and Goldstein J. I.), 1977; *Meteoritics*, v. 12, No. 3, p. 318.
- Моррисон* (Morrison D.), 1973; *Icarus*, v. 19, No. 1, p. 1.
- Моррисон* (Morrison D.), 1974; *Astrophys. J.*, v. 194, No. 1, part 1, p. 203.

- Моррисон* (Morrison D.), 1976a; *Icarus*, v. 28, No. 1, p. 125.
- Моррисон* (Morrison D.), 1976b; *Geophys. Res. Lett.*, v. 3, No. 12, p. 701.
- Моррисон* (Morrison D.), 1977a; In: *Planetary Satellites*/Ed. J. A. Burns.— Tucson: Univ. of Arizona Press, p. 269.
- Моррисон* (Morrison D.), 1977b; *Astrophys. J.*, v. 214, No. 2, part 1, p. 667.
- Моррисон* (Morrison D.), 1977в; *Icarus*, v. 31, No. 2, p. 185.
- Моррисон и Круикшенк* (Morrison D. and Cruikshank D. P.), 1973; *Icarus*, v. 18, No. 2, p. 224.
- Моррисон и Чепмен* (Morrison D. and Chapman C. R.), 1976; *Astrophys. J.*, v. 204, No. 3, part 1, p. 934.
- Моррисон и др.* (Morrison D., Gradie J. C., Rieke G. H.), 1976; *Nature*, v. 260, No. 5553, p. 691.
- Мухин И.*, 1819; О чудесных дождях и низпадающих из воздуха камнях (аэролитах).— Сиб.: Тип. Имн. Восп. Дома, 218 с.
- Пагата* (Nagata T.) (Ed.), 1978; *Proc. Second Symp. on Yamato Meteorites*.— Tokyo: Publ. Nat. Inst. of Polar Res., 267 p.
- Пунан и др.* (Noonan A. F., Rajan R. S., Chodos A. A.), 1974; *Meteoritics*, v. 9, No. 4, p. 385.
- Ньютон* (Newton H. A.), 1888; *J. Amer. Sci.*, v. 36, No. 2, p. 1.
- Пеллас* (Pellas P.), 1972; In: *From Plasma to Planet*. Porc. 21st Notel Symp., Saltsjobaden, Sweden, 6—10 Sept. 1971.— Stockholm.
- Пеллас и др.* (Pellas P., Poupeau G., Lorin J. C., Reeves H., Audouze J.), 1969; *Nature*, v. 223, No. 5203, p. 272.
- Петерсон* (Peterson C.), 1976; *Icarus*, v. 29, No. 1, p. 91.
- Пляшкевич Л. Н., Сандомирская С. М., Заславская Н. И.*, 1980; *Метеоритика*, вып. 39, в печати.
- Пил* (Peale S. J.), 1976; *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*/Eds. G. R. Burbidge, D. Layzer, J. G. Philips.— U. S. A.: Palo Alto, Calif., v. 14.
- Путилин И. И.*, 1953; *Малые планеты*.— М.: Гостехиздат, 412 с.
- Радзиевский В. В.*, 1952; *Астрон. ж.*, т. 29, вып. 2, с. 162.
- Рамбалди и др.* (Rambaldi E., Jagoutz E., Wasson J. T.), 1974; *Mineral. Mag.*, v. 39, No. 305, p. 595.
- Раян* (Rajan R. S.), 1974; *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 38, No. 5, p. 777.
- Раян и др.* (Rajan R. S., Price P. V., Brownlee D. E.), 1973; *Meteoritics*, v. 8, No. 4, p. 425.
- Рейд* (Reid A. M.), 1974; *Meteoritics*, v. 9, No. 4, p. 398.
- Рессел Г. Н., Дэган Р. С., Стюарт Д. К.*, 1935; *Астрономия*, т. I.— М — Л.: ОНТИ, 383 с.
- Ривс и др.* (Reeves H., Fowler W. A., Hoyle F.), 1970; *Nature*, v. 226, No. 5247, p. 727.
- Ройтбурд А. Л.*, 1975; В кн.: *Проблемы современной кристаллографии*/Под ред. Б. К. Вайнштейна.— М.: Наука, с. 345.
- Самойлова-Яхонтова П. С.* (ред.), 1973; *Малые планеты*.— М.: Наука, 360 с.
- Симоненко А. Н.*, 1975; *Элементы орбит 45 метеоритов: Атлас*.— М.: Наука, 68 с.
- Симоненко А. П.*, 1977a; *Земля и вселенная*, № 1, с. 55.

- Симоноенко А. Н., 1977б; Метеоритика, вып. 36, с. 165.
- Симоноенко А. П., 1977в; Письма в Астрон. ж., т. 3, № 1, с. 30.
- Симоноенко А. П., 1978; Метеоритика, вып. 37, с. 3.
- Симоноенко А. П. и Левин Б. Ю., 1972; Метеоритика, вып. 31, с. 45.
- Симоноенко А. П. и Левин Б. Ю., 1974; Метеоритика, вып. 33, с. 157.
- Симоноенко А. Н., Левин Б. Ю., Андерс Э., 1976; Метеоритика, вып. 35, с. 22.
- Смит и Голдстейн (Smith B. A. and Goldstein J. I.), 1977; Geochim. Cosmochim. Acta, v. 41, No. 8, p. 1061.
- Сонет и др. (Sonet C. P., Colburn D. S., Schwartz K.), 1968; Nature, v. 219, No. 5157, p. 924.
- Сонет и др. (Sonet C. P., Colburn D. S., Schwartz K., Keil K.), 1970; Astrophys. Space Sci., v. 7, No. 3, p. 446.
- Тейлор (Taylor R. S.), 1973; Astron. J., v. 78, No. 10, p. 1131.
- Тейлор и др. (Taylor R. S., Gehrels T., Capen R. S.), 1976; Astron. J., v. 81, No. 9, p. 778.
- Уиппл (Whipple F. L.), 1967; Proc. Roy. Soc. London, v. 296A, No. 1446, p. 304.
- Уиппл (Whipple F. L.), 1968; In: Physics and Dynamics of Meteors/Eds. L. Kresák and P. M. Millman.— Dordrecht: Reidel Publ. Co., p. 481.
- Уиппл Ф. Л., Лекар М., Франклин Ф. А., 1976; В кн.: Происхождение Солнечной системы.— М.: Мир, с. 459.
- Уорден и др. (Worden S. P., Stein M. K., Schmidt G. D., Angel J. R. P.), 1977; Icarus, v. 32, No. 4, p. 450.
- Фаулер и др. (Fowler W. A., Greenstein J. L., Hoyle F.), 1962; Geophys. J., v. 6, No. 2, p. 148.
- Фиш и др. (Fish R. A., Goles G. G., Anders E.), 1960; Astrophys. J., v. 132, No. 1, p. 243.
- Форвард (Forward R. L.), 1971; In: Physical Studies of Minor Planets/Ed. T. Gehrels.— Wash.: NASA, p. 585.
- Фредрикссон и Кейл (Fredriksson K. and Keil K.), 1963; Geochim. Cosmochim. Acta, v. 27, No. 7, p. 717.
- Хансен (Hansen O. L.), 1973; Icarus, v. 18, No. 2, p. 237.
- Хансен (Hansen O. L.), 1974; Astrophys. J., v. 188, No 1, part 2, p. L31.
- Хансен (Hansen O. L.), 1976; Astron. J., v. 81, No. 1, p. 74.
- Хансен (Hansen O. L.), 1977а; Icarus, v. 32, No. 2, p. 229.
- Хансен (Hansen O. L.), 1977б; Ibid., p. 229.
- Хансен (Hansen O. L.), 1977в; Ibid., No. 4, p. 458.
- Хей (Hey M. H.), 1966; Catalogue of Meteorites.— London: Trustees of British Museum (Natural History), 637 p.
- Хелин и Шумейкер (Helin E. F. and Shoemaker E. M.), 1977; Icarus, v. 31, No. 4, p. 415.
- Херндон и Херндон (Herndon J. M. and Herndon M. A.), 1977; Meteoritics, v. 12, No. 4, p. 459.
- Хираяма (Hirayama K.), 1923; Japanese J. of Astron. and Astrophys., v. 1, No. 3, p. 55.
- Хладни (Chladni E. F. F.), 1794; Ueber der Ursprung der von Pallas gefundenen und andere ihr ähnlicher Eisenmassen, und über einige damit in Verbindung stehenden Naturerscheinungen.— Riga: bei J. F. Hartknoch, 63 S.

- Хладни* (Chladni E. F. F.), 1799; Phil. Mag., B. 2, S. 337.
Хладни (Chladni E. F. F.), 1803; Ann. Physik, B. 15, S. 429.
Хладни (Chladni E. F. F.), 1819; Ueber Feuer-Meteore und ueber die mit denselben herabfallenden Massen.— Wien: bei J. G. Heubner, 434 S.
- Холлидей* и др. (Halliday I., Blackwell A. T., Griffin A.), 1978; J. Royal Astron. Soc. Canada, v. 72, No. 1, p. 15.
- Цветков В. И.*, 1972; Астроп. вестник, т. 6, № 1, с. 49.
- Цельнер* и *Боуэлл* (Zellner B. and Bowell E.), 1977; In: Comets, Asteroids, Meteorites. Interrelations, evolution and origins/Ed. A. H. Delsemme.— Toledo: Univ. of Toledo Press, p. 185.
- Цельнер* и *Градье* (Zellner B. and Gradie J.), 1976; Astron. J., v. 81, No. 4, p. 262.
- Цельнер* и др. (Zellner B., Gehrels T., Gradie J.), 1974; Astron. J., v. 79, No. 10, p. 1100.
- Цельнер* и др. (Zellner B., Wisniewski W. Z., Andersson L., Bowell E.), 1975; Astron. J., v. 80, No. 11, p. 986.
- Цельнер* и др. (Zellner B., Andersson L., Gradie J.), 1977 a; Icarus, v. 31, No. 4, p. 447.
- Цельнер* и др. (Zellner B., Leake M., Morrison D.), 1977b; Geochim. Cosmochim. Acta, v. 41, No. 12, p. 1759.
- Цельнер* и др. (Zellner B., Leake M., Lebertre T., Duseaux M., Dollfus A.), 1977в; Proc. 8th Lunar. Sci. Conf. — New York et al.: Pergamon Press, v. 1, p. 1111.
- Цельнер* и др. (Zellner B., Lebertre T., Day K.), 1977г.; Proc. 8th Lunar Sci. Conf.—New York et al.: Pergamon Press, v. 1, p. 1091.
- Цеплеха Зд.*, 1978; Метеоритика, вып. 37, с. 60.
- Циммерман* и *Везерилл* (Zimmerman P. D. and Wetherill G. W.), 1973; Science, v. 182, No. 4107, p. 51.
- Чеботарев Г. А.* и *Шмакова М. Я.*, 1971; Бюлл. Ин-та теор. астроном. т. XII, № 8 (141), с. 649.
- Чеботарев Г. А.* и *Шор В. А.*, 1973; Труды Ин-та теор. астроном., вып. XV, с. 60.— Л.: Наука.
- Чеботарев Г. А.*, *Беляев Н. А.*, *Шмакова М. Я.*, 1974; Бюлл. Ин-та теор. астроном., т. XIII, № 8 (151), с. 477.
- Чеботарев Г. А.*, *Беляев Н. А.*, *Еременко Р. Н.*, 1975; Бюлл. Ин-та теор. астроном., т. XIV, № 3 (156), с. 178.
- Чепмен* (Chapman C. R.), 1974; Geophys. Res. Lett. v. 1, No 8, p. 341.
- Чепмен* (Chapman C. R.), 1976; Geochim. Cosmochim. Acta, v. 40, No. 7, p. 701.
- Чепмен* и др. (Chapman C. R., Johnson T. V., McCord T. B.), 1974; In: Physical Studies of Minor Planets/Ed. T. Gehrels.— Wash.: NASA, p. 51.
- Чепмен* и др. (Chapman C. R., McCord T. B., Johnson T. V.), 1973; Astron. J., v. 78, No. 1, p. 126.
- Чепмен* и др. (Chapman C. R., Morrison D., Zellner B.), 1975; Icarus, v. 25, No. 1, p. 104.
- Чердынцев В. В.* и *Абдулгофаров К. К.*, 1956; ДАН СССР, т. 106, № 2, с. 311.
- Чирвинский Н. Н.*, 1923; Мироведение, т. 12, № 1, с. 15.

- Шварц* и др. (Schwartz H. P., Scott S. D., Kissin S. A.), 1975
Geochim. Cosmochim. Acta, v. 39, No. 11, p. 1457.
- Шолл* (Scholl H.), 1976; Sterne und Weltraum, B. 15, N. 7—8, S. 226.
- Шрамм* (Schramm D. N.), 1971; Astrophys. Space Sci., v. 13, No. 1,
p. 249.
- Шрамм* и др. (Schramm D. N., Tera F., Wasserburg G. Y.), 1970;
Earth Planet. Sci. Lett., v. 10, No. 1, p. 44.
- Шубарт* (Schubart J.), 1971; In: Physical Studies of Minor Planets/
Ed. T. Gehrels.— Wash.: NASA, p. 33.
- Шубарт* (Schubart J.), 1974; Astron. Astrophys., v. 30, No. 2, p. 289.
- Шульц* и *Сигнер* (Schultz L. and Signer P.), 1974; Meteoritics, v. 9,
No. 4, p. 402.
- Шумейкер* и *Хелин* (Shoemaker E. M. and Helin E. F.), 1976; NASA
Techn. Memorandum X-3364.
- Шумейкер* и др. (Shoemaker E. M., Helin E. F., Gillet S. L.), 1976;
Geol. Rom., v. 15, p. 487.
- Эверхарт* (Everhart E.), 1973; Astron. J., v. 78, No. 4, p. 316.
- Эпик* (Opik E. J.), 1963; Adv. Astron. Astrophys., v. 2, p. 220.
- Эпик* (Opik E. L.), 1965; Adv. Astron. Astrophys., v. 4, p. 185.
- Эпик* (Opik E. L.), 1966; Mem. Soc. Roy. Sci. Liège, v. 12, p. 575.
- Эпик* (Opik E. L.), 1975; Irish Astron. J., v. 12, No. 1—2, p. 1.
- Элик* (Opik E. L.), 1976; Interplanetary Encounters.— New York:
Elsevier, 156 p.
- Юнг* (Young J.), 1926; Proc. Roy. Soc. London, v. 112A.—London,
p. 630.
- Юри* (Urey H. C.), 1955; Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A., v. 41, No. 3,
p. 127.
- Явнель А. А.*, 1974; Астрон. вестник, т. VIII, № 4, с. 234.
- Явнель А. А.*, 1978; Метеоритика, вып. 37, с. 101.
- Явнель А. А.*, *Боровский И. Б.*, *Ильин Н. П.*, *Марчукова И. Д.*,
1958; ДАН СССР, т. 123, № 2, с. 256.
- Яккиа* (Lacchia L. G.), 1974; Sky and Tel., v. 48, No. 1, p. 4.
- Яничек* и др. (Janiczek P. M., Seidelman P. K., Duncombe R. L.),
1972; Astron. J., v. 77, No. 9, p. 764.