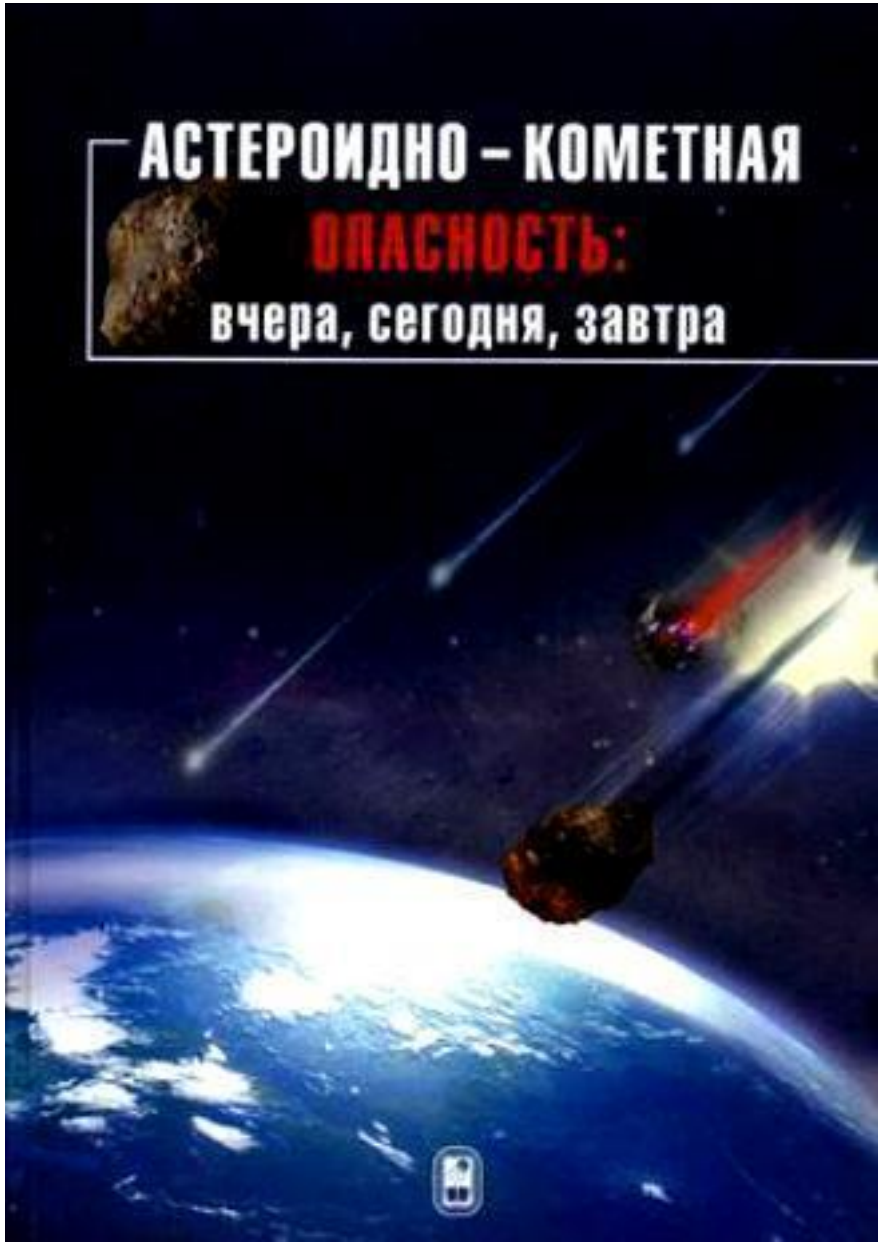


**АСТЕРОИДНО – КОМЕТНАЯ**  
**ОПАСНОСТЬ:**  
**вчера, сегодня, завтра**



Коллектив авторов

**Астероидно-кометная опасность:  
вчера, сегодня, завтра**

Издательская фирма "Физико-математическая литература"

2010

## **Коллектив авторов**

Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра  
/ Коллектив авторов — Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2010

Проблема астероидно-кометной опасности, т. е. угрозы столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы, осознается в наши дни как комплексная глобальная проблема, стоящая перед человечеством. В этой коллективной монографии впервые обобщены данные по всем аспектам проблемы. Рассмотрены современные представления о свойствах малых тел Солнечной системы и эволюции их ансамбля, проблемы обнаружения и мониторинга малых тел. Обсуждаются вопросы оценки уровня угрозы и возможных последствий падения тел на Землю, способы защиты и уменьшения ущерба, а также пути развития внутрироссийского и международного сотрудничества по этой глобальной проблеме. Книга рассчитана на широкий круг читателей. Научные работники, преподаватели, аспиранты и студенты различных специальностей, включая, прежде всего, астрономию, физику, науки о Земле, технические специалисты из сферы космической деятельности и, конечно, читатели, интересующиеся наукой, найдут для себя много интересного.

© Коллектив авторов, 2010

© Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2010

# Содержание

Предисловие	5
Глава 1	8
1.1. Понятие астероидно-кометной опасности (АКО)	8
1.2. Астрономический аспект проблемы АКО	10
1.3. Геофизический аспект	12
1.4. Немного истории	14
1.5. Современное состояние исследований по проблеме АКО	17
Глава 2	20
2.1. Классификация малых тел Солнечной системы	20
2.2. Происхождение малых тел, их эволюционная взаимосвязь	25
2.3. Связь и различия между малыми телами	28
2.4. Миграция малых тел в Солнечной системе	30
2.5. Свидетельства столкновений малых тел с планетами, их спутниками и между собой	31
Глава 3	39
3.1. Историческое введение	39
Конец ознакомительного фрагмента.	43

# Авторский коллектив

## Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра

### Предисловие

В кругу наук астрономия занимает особое место. С одной стороны – это точная наука, в которой, по представлениям неспециалистов, исследования проводятся с высочайшей «астрономической» точностью. (Это, конечно, не всегда так. Например, в астрофизике и особенно в космологии серьезным достижением может иногда считаться оценка некоторого важного исследуемого фактора с точностью до порядка величины!) С другой стороны, астрономия – наука, имеющая ярко выраженный мировоззренческий характер. Список извечных проблем, уже сама постановка которых отличает вид *homo sapiens* от всего остального живого мира, включает вопросы, ответы на которые призвана дать (хотя бы частично) именно астрономия. Этот список включает представления, которые легли в основу множества религий и философий, и стали неисчерпаемым источником творческих идей для людей искусства и науки: происхождение и пути развития окружающего нас Большого Мира (т. е. Вселенной), происхождение жизни, множественность обитаемых миров, судьба нашей цивилизации и др. Астрономы, как и любые ученые, занимающиеся фундаментальной наукой, должны, конечно, прежде всего добывать новые знания о Вселенной, но на них лежит также обязанность перед обществом нести эти знания людям, причем в доступной форме. Природа, в том числе и природа человеческая, «не терпит пустоты», и если астрономы и другие ученые уклонятся от их долга постоянно бороться за высокий уровень человеческой культуры, шарлатанство обязательно заполнит этот вакуум. Поэтому даже в наш век узкой специализации, неизбежной при столь гигантском объеме накопленных и получаемых знаний, профессиональный ученый (астрономов это касается в первую очередь) не должен замыкаться в узком круге своих исследований, но обязан быть достаточно подготовленным по широкому кругу этих самых извечных проблем. Проблема астероидно-кометной опасности (АКО) из их числа.

В настоящее время тема АКО стала «модной» не только в Голливуде. Многие средства массовой информации заполнены материалами о близкой всемирной катастрофе из-за падения кометы или астероида (при этом часто ссылаются на сведения, якобы получаемые от астрономов). В мире науки внимание к проблеме АКО еще более заметно. На рубеже XX и XXI веков началась серьезная переоценка возможности столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы. Эта проблема, которая долгое время была предметом изучения узкого круга специалистов, осознается в наши дни гораздо более широко (включая правительства ряда стран и ООН) как комплексная глобальная проблема, стоящая перед человечеством. (Под глобальными проблемами человечества сегодня понимают всеобщие, имеющие планетарный масштаб угрозы и противоречия в жизни общества, в том числе существовавшие частично или в неявном виде и ранее, и проявившиеся на современном этапе развития земной цивилизации в ходе процессов деятельности людей, а также в результате получения человечеством новых знаний [Шойгу и др., 1997].) Глобальных проблем, стоящих перед человечеством, много, и проблема АКО, несомненно, входит в их число.

Причина такой переоценки состоит в том, что на рубеже веков накопилась некоторая критическая масса фундаментальных знаний о населенности Солнечной системы малыми телами, о динамической и физической эволюции этого населения. Прорыв в этой области фундаментальных знаний происходит благодаря появлению новых наблюдательных технологий, прове-

дению специальных программ наблюдений, осуществлению космических проектов по исследованиям малых тел Солнечной системы. Задачей фундаментальной науки здесь является получение новых знаний по проблеме АКО. Новые знания – это не только данные, получаемые в результате работ по обнаружению и выявлению свойств огромного числа декаметровых и гектометровых объектов в околоземном пространстве. Это и такие фундаментальные аспекты, как выявление причин возникновения резервуара тел с орбитами, сближающимися с орбитой Земли, и источников его постоянного пополнения, это и имеющая вполне практический интерес методика получения обоснованных оценок степени угрозы в каждом конкретном случае и т. д.

Отличия катастроф, обусловленных столкновениями малых тел с Землей, от других природных катастроф состоят в том, что, во-первых, не существует верхнего предела энергии, приносимой сталкивающимися с Землей телом. В принципе, под угрозой находится само существование жизни на Земле. Во-вторых, в отличие от многих природных катастроф, падение на Землю космического тела можно заранее предсказать и при наличии соответствующих технологий предупредить.

По теме АКО проводятся специальные конференции (по большей части международные), опубликованы тысячи научных статей и довольно много книг. В отечественной литературе можно отметить лишь несколько книг. Первая книга по теме – «Астероидно-кометная опасность», СПб.: ИТА РАН, ред. А. Г. Сокольский, 1996. Отличная популярная книга – «Угроза с неба: рок или случайность?» (М.: Космоинформ, ред. А. А. Боярчук, А. М. Микиша, М. А. Смирнов) была опубликована в 1999 г. Увы, обе книги уже во многом устарели. Для углубленного изучения одной из важных составляющих проблемы АКО – взаимодействия космических тел с Землей при столкновениях – рекомендуем сравнительно недавно изданную и весьма удачную монографию «Катастрофические воздействия космических тел», М.: ИКЦ «Академкнига», ред. В. В. Адушкин, И. В. Немчинов, 2005.

Предлагаемая широкому кругу читателей монография «Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра» является *первым* изданием по проблеме АКО, в котором проблема рассматривается *комплексно*.

Мы (редакторы) специально старались выдержать стиль этой книги одновременно и как научного издания (приведены необходимые формулы, многочисленные ссылки и т. д.), и как достаточно популярной книги, т. е. с постоянным вниманием к более массовому читателю, поскольку цель этой книги – дать каждому астроному, физику или просто любителю науки представление о состоянии этой проблемы. Для экспресс-знакомства с проблемой АКО можно рекомендовать главу 1, имеющую вводный по назначению и наиболее доступный по форме характер. Она дает в сжатой форме общую картину, отсылая за деталями к соответствующим главам.

Авторы монографии – известные эксперты по различным направлениям комплексной проблемы АКО. Многие из них – члены Экспертной рабочей группы по проблеме астероидно-кометной опасности при Совете РАН по космосу. При подготовке книги были также использованы материалы, полученные в процессе научно-исследовательской работы «Эгида» (2006–2008 гг.), поддержанной Российским космическим агентством.

Полный список авторов с указанием разделов, в написании которых они принимали участие, приведен ниже.

**Глава 1.** Авторы: Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова.

**Глава 2.** Авторы: Л. В. Рыхлова, Б. М. Шустов, Е. С. Баканас; раздел. 2.2 написан при участии Г. В. Печерниковой, Д. О. Глазачева, А. В. Витязева.

**Глава 3.** Авторы: В. А. Шор, Ю. А. Чернетенко, О. М. Кочетова.

**Глава 4.** Авторы: Ю. Д. Медведев, Ю. А. Чернетенко; В. В. Емельяненко (разделы 4.4, 4.5), С. А. Нароенков (раздел 4.6).

**Глава 5.** Авторы: Н. В. Куликова, С. И. Барабанов (разделы 5.3.1, 5.3.2).

**Глава 6.** Автор раздела 6.1 – С. И. Барабанов, 6.2 – В. Г. Дегтярь, В. А. Волков, 6.3 – Б. М. Шустов, С. И. Барабанов, 6.4 – В. А. Волков, В. Г. Дегтярь, 6.5 – С. А. Нароенков.

**Глава 7.** Авторы: В. А. Шор, О. М. Кочетова, Л. Л. Соколов (раздел 7.7), Ю. А. Чернетенко (раздел 7.8).

**Глава 8.** Авторы: Н. А. Артемьева, О. П. Попова, И. В. Немчинов, В. В. Шу-валов, В. В. Светцов.

**Глава 9.** Автор раздела 9.1 – Б. А. Иванов, 9.2 – В. В. Светцов, 9.3, 9.4 – В. А. Шор, Ю. А. Чернетенко, О. М. Кочетова.

**Глава 10.** Авторы: В. Г. Польш, В. А. Волков, В. Г. Дегтярь, А. В. Симонов.

**Глава 11.** Авторы: Б. М. Шустов, Р. М. Тимербаев, Л. В. Рыхлова.

**Приложения** к книге подготовлены Е. С. Баканас. Рисунки во всех главах приводятся с указанием ссылки на источник. В случае отсутствия указания авторами рисунков являются авторы данных разделов. Е. С. Баканас также внесла большой вклад в подготовку компьютерного варианта книги.

В книге приводится много ссылок на различные сайты по состоянию на начало 2010 г. Авторы надеются, что в случае изменения адресов сайтов читатели смогут найти интересные их материалы на сайтах учреждений, названия которых присутствуют в приведенных ссылках.

Редакторы и авторы книги благодарны РФФИ за поддержку издания этой книги (грант РФФИ 09-02-07026 и 09-02-02006).

*Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова, Институт астрономии РАН, 2009 г.*

# Глава 1

## Что такое астероидно-кометная опасность?

### 1.1. Понятие астероидно-кометной опасности (АКО)

*Несчастливая планета  
Попала в дождь из падающих звезд  
С диаметром от мили до полметра.*

*С. Кирсанов*

Современный мир подвержен многим опасностям природного и техногенного характера. Среди них – угроза падения небесных тел, точнее малых тел Солнечной системы, на Землю. Эти тела принято подразделять, в зависимости от размера и свойств, на межпланетную пыль, метеороиды, астероиды и кометы. Главный параметр, по которому проводится классификация, – размер тела. Характерные размеры для тел различных классов приведены на рис. 1.1 (см. вклейку).

Неопределенность используемых в научной литературе значений границ между некоторыми классами довольно велика. В последнее время к этому списку добавляют планеты-карлики, но эти тела, вообще говоря, не относятся к малым телам (см. раздел 2.1) и, кроме того, не имеют возможности столкнуться с Землей за оставшееся время жизни Солнечной системы. Это время ограничено как астрофизическими, так и небесно-механическими процессами. Согласно теории эволюции звезд, центральное тело Солнечной системы – Солнце не претерпит изменений еще в течение примерно 7 млрд лет. Затем Солнце превратится в огромную звезду – красный гигант, который поглотит все внутренние планеты. С другой стороны, Солнечная система устойчива в динамическом отношении на протяжении, по крайней мере, примерно 5 млрд лет для Земли и всех больших внешних планет [Холшевников, Кузнецов, 2007].

Сближаться с Землей при своем движении в пространстве и падать на Землю могут любые малые тела. Конечно, выпадение космической пыли, т. е. частиц от субмикронного до субмиллиметрового размера, не составляет для

Земли какой-либо реальной угрозы и вообще не оказывает сколько-нибудь значительного воздействия на нашу планету. Несмотря на часто появляющиеся в СМИ сообщения о том, что наша планета «раздувается и тяжелеет», прирост ее массы за счет выпадения вещества из космоса в настоящую эпоху ничтожен. Оценки притока метеорного вещества лежат в пределах 10–300 тыс. тонн в год (за миллион лет радиус Земли увеличивается в среднем всего лишь примерно на 1 мм!). Более крупные тела (метеороиды) проявляют себя при столкновении с Землей как сгорающие в атмосфере метеоры и болиды. Размеры таких тел, как правило, не превышают нескольких метров. Некоторые метеороиды долетают до поверхности Земли (на Земле их находят в виде метеоритов). Долетит или не долетит тело до поверхности Земли – зависит от многих параметров: размеров, состава, скорости, формы и структуры тела. Наиболее устойчивы к разрушению при пролете в атмосфере железные метеороиды. Значительная часть метеороидов, по-видимому, представляет собой довольно рыхлые тела, образующиеся в результате распада кометных ядер. Прошедший распад ядра кометы Швассмана – Вахмана 3 весной 2006 г. (астрономы различных обсерваторий насчитали свыше 60 новых фрагментов ядра кометы) стал наблюдаемым свидетельством того, что в образовавшемся метеорном рое

содержатся тела размерами до нескольких сотен метров. Наличие крупных тел в метеорных и болидных потоках впервые выявлено в наблюдениях, начатых в ИНАСАН в начале 1990-х гг. (см. главу 5).

Существует распространенное мнение, что угроза, обусловленная падением метеоритов на Землю, малозначительна для людей, т. е. для вполне конкретных жителей Земли. Действительно, непосредственное попадание метеорита в человека – явление крайне редкое и при рассмотрении риска может практически не учитываться. Статистические оценки ущерба от падения метеоритов на Землю не очень точны, но в любом случае этот ущерб незначителен по сравнению с другими, куда более весомыми факторами риска. Стоит, например, вспомнить, что в России на дорогах в результате ДТП ежегодно погибает не менее 30 тыс. человек!

Ни микрочастицы, ни более крупные метеориты не представляют действительно серьезной угрозы и для человеческой цивилизации в целом (кстати, современные атомные электростанции – объекты особо высокого риска – спроектированы так, что выдерживают даже падение на них самолета, а это сравнимо с действием довольно крупного метеорита). Земная атмосфера в целом прекрасно защищает нас от ударов тел размером до нескольких метров. Пока не началось массовое проникновение человека в космическое пространство, имеет смысл говорить только об угрозе действительно опасных столкновений с Землей достаточно крупных тел: астероидов и комет (крупных фрагментов) размером не менее нескольких десятков метров. **Именно эта угроза и составляет смысл понятия астероидно-кометной опасности (АКО).**

Крупные небесные тела способны достичь поверхности Земли или нижних слоев атмосферы и причинить сильные разрушения. Последствия таких падений сравнимы с крупными природными катастрофами или взрывом водородной бомбы. Самое разрушительное землетрясение унесло около 2 млн человеческих жизней. Такие стихийные бедствия, как оползни, цунами, ураганы и извержения вулканов, уносили до 300 тыс. жизней людей каждое. Столкновение небесного тела с Землей, вообще говоря, не имеет верхнего предела разрушительности – оно может стать причиной гибели всего человечества и даже почти всего живого на Земле. Поэтому, несмотря на чрезвычайную редкость таких событий, они становятся в ряд с другими источниками риска гибели.

По оценкам, проведенным НАСА [NASA report, 2003], среднее число жертв столкновений достигает тысячи человек в год. Конечно, это средняя оценка и ее точность не превышает одного-двух порядков величины.

Сотрудники университета штата Аризона (США) разработали программу расчета последствий столкновений Земли с кометами и астероидами, которая называется Earth Impact Effects Program. Программой может воспользоваться любой, зайдя на сайт <http://www.lpl.arizona.edu/impaceteffects/>. Методика расчета описана в работе [Collins et al., 2005]. Ко всем таким методикам нужно относиться, конечно, с пониманием того, что точность «предсказания» последствий невелика. Уж слишком сложный и многопараметрический процесс рассчитывается. Несмотря на низкую вероятность столкновения, число жертв катастрофы столь велико, что в расчете на год сравнимо с числом жертв авиакатастроф, убийств и т. п. (подробнее см. в главе 9).

Проблема АКО имеет ярко выраженный комплексный характер. В этой книге мы рассмотрим, главным образом, астрономические вопросы, геофизические (точнее – процессы столкновений малых тел с Землей и их последствия), научно-технологические вопросы, связанные с предотвращением угрозы, и лишь в ограниченной степени коснемся (тоже очень важных составляющих проблемы АКО!) – вопросов уменьшения ущерба, социальной психологии и политических аспектов (конкретно – организации международного сотрудничества по проблеме). Кратко охарактеризуем содержание основных аспектов проблемы, рассматриваемых в книге.

## 1.2. Астрономический аспект проблемы АКО

Вопрос об оценках значимости астероидно-кометной опасности связан, в первую очередь, с нашим знанием о населенности Солнечной системы малыми телами, особенно теми, что могут столкнуться с Землей. Такие знания дает астрономия. Человечество уже накопило огромный объем информации о малых телах. В главе 2 представлены общие сведения о малых телах, об их месте в эволюции Солнечной системы, о различиях, сходствах и взаимосвязях между ними. Поскольку Главный пояс астероидов, Транснептуновый пояс и облако Оорта считаются основными источниками объектов, поступающих в околоземное пространство, в этой главе мы уделим им особое внимание. Большой вклад в исследование проблемы АКО вносят свидетельства столкновений малых тел с планетами.

В последующих главах (главах 3–5) представлены более глубокие сведения о каждом классе малых тел. Основная часть этих знаний была получена методами наблюдательной астрономии.

Перед наблюдательной астрономией в плане изучения проблемы АКО стоят несколько задач. Прежде всего, необходимо выявить все достаточно крупные астероиды и кометы, определить их орбиты, а также регулярно пополнять каталог новыми объектами и их высокоточными орбитами. Это даст возможность своевременно определить, какие из небесных тел могут стать опасными космическими объектами, и оценить вероятность их столкновения или тесного сближения с Землей. Регулярные наблюдения таких объектов обеспечат уточнение их орбит и продление прогноза. Тем самым, появляется возможность предсказать столкновение достаточно крупного тела с Землей за много лет, что даст человечеству возможность заблаговременно принять соответствующие меры. Конечно, задачу выявить «все» такие тела не следует понимать в буквальном смысле. «Все» такие тела обнаружить невозможно, и можно говорить лишь о некоторой оценке. Например, в американском проекте Spaceguard Survey («Космическая стража») поставлена задача – «выявить не менее 90 % астероидов крупнее 1 км». Здесь под 90 % также понимается некоторая оценка.

Еще одно замечание относится к определению «достаточно крупные». Это определение следует относить к телам, представляющим в смысле АКО наибольшую угрозу. Если суммировать детальную информацию о частоте падения и ущербе от падения тел данного размера, представленную в главах 8 и 9, то можно сказать, что на шкале времени существования человечества ( $\sim 10^5$  лет) наибольшую опасность представляют столкновения со сравнительно небольшими телами, размером порядка 50–100 м. Пока что не существует наблюдательных технологий, позволяющих заблаговременно обнаруживать и проводить мониторинг движения даже для небольшой доли тел такого размера. Поэтому нужно быть готовым к решению задачи обнаружения опасных космических объектов на подлете к Земле. Космические объекты, имеющие размеры менее нескольких сотен метров, будь то астероиды, метеороиды или кометы, могут быть доступны для наблюдений только в достаточно близких окрестностях Земли. При этом объект, угрожающий столкновением с Землей, может быть обнаружен лишь за несколько недель (или даже дней) до падения его на Землю. Переходя к еще меньшим объектам деkamетрового размера (именно такого размера было Тунгусское тело!), следует сказать, что время подлета после обнаружения исчисляется десятками часов. Самые же мелкие объекты более или менее систематически изучаются только в процессе их сгорания в атмосфере Земли (метеоры и болиды) либо – в чрезвычайно редких случаях – в виде метеоритов, упавших на Землю.

Поиск движущихся по столкновительным траекториям опасных объектов – задача огромной сложности. Решение этой задачи потребует организации патрулирования всего неба, но при этом с поверхности Земли принципиально не удастся обнаружить те тела, которые движутся со стороны Солнца и не видны на ярком фоне дневного неба. Кроме того, большое

значение имеет погодный фактор. Поэтому наиболее полное решение проблемы обнаружения большинства потенциально опасных небесных тел может быть получено лишь с привлечением специальных космических средств наблюдения. В главе 6 подробно рассматриваются существующие и проектируемые средства наблюдений как наземного, так и космического базирования.

Наука о движении небесных тел – небесная механика – объясняет возможность проникновения отдельных астероидов, основная масса которых располагается между орбитами Марса и Юпитера, внутрь орбиты Марса и даже орбиты Земли и в общем позволяет оценить как количество опасных объектов, так и частоту столкновений их с Землей. Сейчас (по состоянию на 1 июня 2010 г.) известно около 7 тыс. астероидов, орбиты которых сближаются с орбитой Земли на расстояния менее 50 млн км. До 20 % этих тел имеют еще более опасные орбиты (сближаются с орбитой Земли на расстояния менее 8 млн км). Значительная доля таких опасных тел обусловлена тем, что они имеют в большинстве своем малые размеры и обнаруживаются только на близких расстояниях. Движение этих тел тщательно рассчитывается, с тем чтобы оценить вероятность действительно угрожающих сближений. Конечно, подходы классической небесной механики, прошедшие проверку в течение столетий, используются в полном объеме, но даже в этой области возможны очень существенные нововведения. Пример – недавний «бум», связанный с массовым осознанием существенности эффекта Ярковского для эволюции орбит астероидов. Еще одна тема – так называемые зоны резонансного возврата – стала особенно актуальной в связи с исследованиями эволюции орбит малых тел в результате близких прохождений в окрестности планеты и последующих столкновений с ней малых тел. Весьма сложна задача расчета орбит комет из-за множества дополнительных плохо рассчитываемых негравитационных факторов (например, нереально с высокой точностью рассчитать действие газовых потоков, выходящих из ядра испаряющейся кометы, на движение ядра). Эти сообщения относятся к орбитам как короткопериодических, так и долгопериодических комет. Появление последних в настоящее время вообще практически непредсказуемо. Долгопериодические кометы обнаруживаются, в лучшем случае, лишь за несколько месяцев – 1 год до их появления в окрестности Солнца. В работе [Huebner et al., 2009] приводится типичный пример: комета C/1983 H1 (IRAS – Araki – Alcock) с орбитальным периодом 963,22 года, открытая 27 апреля 1983 г., уже через две недели (11 мая 1983 г.) пролетела мимо Земли на расстоянии 0,0312 а.е. Кроме того, такие кометы имеют большую скорость относительно Земли. Глава 7 посвящена рассмотрению небесно-механических подходов к проблеме АКО.

В процессе развития исследований таких крупных проблем, как АКО, обычно выделяются некоторые (знаковые) моменты, существенно меняющие сам ход исследований или отношение к проблеме. В истории изучения проблемы АКО можно выделить следующие моменты:

- появление в конце 80-х гг. XX века в практике астрономических наблюдений новых инструментов (прежде всего, эффективных ПЗС-приемников, специализированных широкоугольных телескопов и скоростных систем обработки), позволивших проводить оперативные, широкие и глубокие обзоры и резко увеличить объем и качество знаний о популяциях малых тел Солнечной системы;

- открытие ставшего уже знаменитым астероида Апофис. Обнаруженный в 2004 г. потенциально опасный объект 2004 MN4, или (99942) Apophis, который имеет размер 200–350 м, в 2029 г. пройдет в опасной близости от Земли. Сейчас в мире активно исследуется возможная эволюция орбиты этого астероида. Согласно результатам недавних расчетов, в 2029 г. астероид пройдет на расстоянии 36,1–39,2 тыс. км от Земли. В 2036 г. он имеет существенно ненулевую вероятность столкнуться с Землей. Более подробно об Апофисе см. в главе 7. Обнаружение такого тела еще раз показало, что мы очень мало знаем о потенциально опасных объектах и никто не гарантирует, что завтра (может быть, уже слишком поздно) не будет обнаружен новый «Апофис». Впрочем, такие объекты уже обнаружены (см. приложение 1).

### 1.3. Геофизический аспект

Столкновения небесного тела с Землей – это целый комплекс процессов. Сначала небесное тело встречается с атмосферой Земли, которая оказывает существенное воздействие на тело, вызывая его торможение, нагрев и разрушение. Науку, занимающуюся изучением метеорных потоков, прохождения в атмосфере Земли метеороидов, определенная часть которых не сгорает в земной атмосфере, а падает на земную поверхность в виде «небесных камней» (метеоритов), иногда называют метеорной астрономией, хотя часть этих вопросов – предмет изучения методами других наук: геофизики, в том числе физики атмосферы, и др.

Небесные тела, имеющие малые размеры, полностью сгорают в атмосфере и не оказывают никакого воздействия на поверхность Земли. Тела большего размера способны пройти сквозь атмосферу и достичь поверхности с космическими скоростями. При падении на сушу образуется кратер и генерируются сейсмические волны. При падении на водную поверхность могут образовываться цунами.

В процессе прохождения атмосферы Земли небесное тело размером менее 10 м теряет свою скорость и при падении на поверхность будет способно причинить ущерб лишь на площади, соизмеримой со своим размером, – поразить человека, животное, автомобиль или здание. Небесные тела большего размера – начиная с диаметра 50 м – способны причинить значительно более серьезный ущерб. Они могут или «взорваться» в нижних слоях атмосферы, как Тунгусское тело, или, достигнув поверхности, образовать кратер и произвести разрушения на площади в тысячи квадратных километров. Энергия таких взрывов и ударов эквивалентна взрыву водородной бомбы мощностью более 10 Мт. Катастрофу такого рода можно назвать *локальной*. Небесное тело диаметром от нескольких сотен метров до 1,5 км при падении на Землю проходит сквозь все слои атмосферы, практически не потеряв скорости, и врезается в поверхность (суши или океана) с огромной энергией. Последствия такого удара подобны крупнейшим землетрясениям, «взрывам» вулканов или «ограниченной ядерной войне». На суше при этом образуются ударные кратеры. В океане при таком падении, кроме кратера на дне, образуются грандиозные волны – цунами. Разрушения и пожары могут охватить миллионы квадратных километров (вплоть до целого материка). Катастрофу такого рода можно назвать *региональной*.

Начиная с некоторого порогового значения эквивалентной мощности, которое оценивается величиной  $2 \cdot 10^5$  Мт, что соответствует падению на Землю небесного тела диаметром свыше примерно 1,5 км, последствия столкновения охватывают весь земной шар, в силу чего такую катастрофу называют *глобальной*.

В табл. 1.1 сведены оценки частоты и результатов столкновений малых тел.

Таблица 1.1. Частота и результаты столкновений малых тел с Землей

Объект	Размер $D$	Частота (1 раз в ... лет)	Размер кратера (км)	Результат столкновения с Землей
Пылинка	$< 0,1$ см			Сгорает
Метеороид	$0,1$ см $< D < 0,5$ м			Сгорает
	$0,5$ м $< D < 20-30$ м			Долетает до Земли с малой скоростью
	$> 30$ м	250	Нет Да	Типа Тунгусского тела Кратер типа Аризонского Локальная катастрофа
Астероид (комета)	$> 100$ м	5 тыс.	$> 2$	Региональная катастрофа
	$> 1$ км	1 млн	$> 20$	Глобальная катастрофа
	10 км	100 млн	200	Конец цивилизации

Как видно из табл. 1.1, результаты столкновения небесного тела с Землей разнообразны и могут иметь самые печальные последствия для жизни и деятельности людей. Более подробно

последствия падения крупных тел на Землю рассмотрены в главе 8, а частота и энергии столкновений малых тел с Землей и оценки рисков – в главе 9.

## 1.4. Немного истории

*Бывает нечто, о чем говорят: «смотри, вот это новое»;*

*Но это было уже в веках, бывших прежде нас.*

*Нет памяти о прежнем; да и о том, что будет,*

*Не останется памяти у тех, которые будут после.*

*Книга Екклесиаста, 1:9, 10*

Процессы столкновения малых тел с другими телами Солнечной системы, точнее их последствия (например, ударные кратеры на Луне и на Земле) изучались уже на протяжении столетий. Однако целенаправленное изучение небесных объектов, способных сближаться с Землей или даже сталкиваться с ней – сравнительно молодая отрасль астрономии. Это обусловлено тем, что, как уже отмечалось, осознание проблемы АКО как одной из глобальных проблем, угрожающих цивилизации, произошло всего лишь около 20 лет тому назад.

О существовании комет, способных проникать внутрь земной орбиты, было известно давно. Но правильному представлению о возможных последствиях столкновений Земли с кометами мешали господствовавшие представления о кометах как о роях пыли и газа. Как правило, считалось, что при сближении (столкновении с кометой) могут произойти массовые отравления жителей Земли. Только в 50-х гг. XX в. была предложена ледяная модель кометного ядра, состоящего из замерзших газов и замороженных в лед частиц твердого вещества. Другими телами, которые в принципе могли угрожать Земле, считались астероиды.

Еще 80 лет назад полагали, что все орбиты астероидов находятся в пределах так называемого Главного пояса астероидов, т. е. между орбитами Марса и Юпитера. Однако в 1932 г. был открыт первый астероид, орбита которого имела перигелийное расстояние меньше среднего радиуса орбиты Земли, т. е. в принципе его орбита допускала возможность сближения астероида с Землей. Этот астероид вскоре был «утерян» и вновь открыт в 1973 г. Он получил номер 1862 и имя Аполлон. В 1936 г. на расстоянии 2 млн км от Земли пролетел астероид Адонис, а в 1937 г. астероид Гермес пролетел на расстоянии 750 тыс. км от Земли. Гермес – двойной астероид с диаметром компонентов почти 1,5 км, был открыт всего за 3 месяца до его максимального сближения с Землей. После пролета Гермеса астрономы начали осознавать научную проблему астероидной опасности.

К 70-м гг. XX в. на разных обсерваториях был открыт первый десяток тел, орбиты которых либо лежат внутри орбиты Земли, либо подходят близко к ней. В 1973 г. в Паломарской обсерватории (США) был начат целенаправленный поиск тел, сближающихся с Землей. Наблюдения в основном проводились с 46-см фотографической камерой Шмидта. В течение года выполнялось до 2000 фотографий отдельных участков неба, на которых обнаруживалось в среднем свыше десяти астероидов с быстрым движением, свидетельствующем об их принадлежности к астероидам, сближающимся с Землей (АСЗ).

С 80-х гг. XX в. в астрономии стала использоваться другая, более прогрессивная техника наблюдений, сменившая фотографию. Это микроэлектронные приемники излучения (ПЗС-матрицы, т. е. приборы с зарядовой связью). Первые опыты по использованию ПЗС-приемников для слежения за малыми планетами и поиска неизвестных объектов были начаты Т. Герелсом в 1983 г. в обсерватории Стьюарда Аризонского университета (Китт Пик, США). В течение последующего десятилетия группа Герелса с помощью 91-см телескопа Spacewatch обнаружила около половины всех открытых за этот период АСЗ. К настоящему времени аст-

рономические наблюдения с помощью ПЗС-камер уже полностью вытеснили фотографию при наблюдении малых тел.

В самом начале 80-х гг. XX в. была опубликована гипотеза Л. Альвареса и его соавторов [Alvarez et al., 1980] о глобальной катастрофе, охватившей Землю 65 млн лет назад в результате ее столкновения с десятикилометровым астероидом. Согласно гипотезе, катастрофа послужила причиной массового вымирания живых существ на рубеже мезозойской и кайнозойской эр в истории Земли. В последующие годы гипотеза нашла дополнительные подтверждения, в частности в результате обнаружения Альваресом слоя осадочных пород, обогащенных иридием, в самых различных регионах Земли. Иридий – чрезвычайно редко встречающийся на Земле химический элемент, а в метеоритах отмечается его 30-кратный избыток.

Еще одним событием, привлечшим к себе большое внимание, явилось прохождение трехсотметрового астероида вблизи Земли 23 марта 1989 г. Тревожным являлось то обстоятельство, что астероид был обнаружен только тогда, когда уже стал удаляться от Земли. Опираясь на этот факт, Американский институт аэронавтики и космонавтики опубликовал в 1990 г. меморандум, призывающий к изучению астероидной опасности и способов предотвращения столкновений. В ответ на этот меморандум Палата представителей Конгресса США поручила НАСА изучить проблемы обнаружения опасных космических объектов, их перехвата и активной защиты от них.

В июне 1991 г. в США было проведено Международное совещание «The Near-Earth-Object Detection Workshop» («Рабочее совещание по проблеме обнаружения объектов, сближающихся с Землей») по первой из указанных проблем. На совещании были выработаны рекомендации по интенсификации поиска и слежения за АСЗ. Совещание организовало Международную рабочую группу НАСА по данной проблеме из представителей американских и других зарубежных специалистов во главе с Д. Моррисоном. Рабочей группой под руководством Д. Моррисона был подготовлен доклад [Morrison, 1992], который был представлен Конгрессу США. В докладе прежде всего констатировалось, что первым шагом на пути предупреждения или уменьшения последствий космической катастрофы должен быть интенсивный поиск объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ), и детальный анализ их орбит.

В 1994 г. НАСА получило новую директиву Конгресса США по осуществлению возможно более полной каталогизации опасных астероидов и комет размерами свыше 1 км. Новая директива нацеливала НАСА на выполнение этой задачи совместно с Министерством обороны США и космическими агентствами других стран в наиболее сжатые сроки. Для разработки нового плана была образована Рабочая группа под руководством Ю. Шумейкера. Доклад Рабочей группы Шумейкера в конце июня 1995 г. был представлен Конгрессу [Shoemaker et al., 1995].

В докладе Рабочей группы Шумейкера была сделана ставка на использование уже имеющихся или строящихся телескопов меньших размеров и в меньшем числе, но оснащаемых ПЗС-матрицами новейших разработок с большой (до 75 %) квантовой эффективностью и малым временем считывания информации. В докладе была предложена новая стратегия проведения обзора, которая, в сочетании с возросшими инструментальными возможностями, позволяла добиться значительной полноты обзора уже в течение первого десятилетия его полномасштабного осуществления.

Описанный выше в общих чертах проект наблюдения получил название «Обзор – Космическая стража» или просто «Космическая стража» (Spaceguard Survey). Проект стартовал под эгидой НАСА в 1998 г. На его реализацию было выделено более 50 млн долларов. Надо отметить, что проект выполняется успешно и на момент написания книги близок к завершению.

Мы специально остановились на принципах организации этого знакового проекта, поскольку аналогичные идеи лежат в основе и всех других подобных систем, развиваемых и планируемых в наши дни, конечно, с учетом изменения (улучшения) параметров инструмен-

тов, поскольку ставятся задачи обнаружения тел размерами гораздо меньше 1 км (см. также главу 6.)

В августе 1991 г. XXI Генеральная ассамблея Международного астрономического союза (МАС), проходившая в Буэнос-Айресе, приняла специальную резолюцию в поддержку исследования астероидной опасности и организовала Рабочую группу по объектам, сближающимся с Землей, из представителей ряда комиссий МАС. В резолюции Генеральной ассамблеи МАС содержится призыв к астрономам принять участие в изучении потенциальной угрозы от сближающихся с Землей астероидов и комет, а странам-членам МАС – кооперировать имеющиеся инструменты и материальные ресурсы для открытия новых и слежения за известными АСЗ.

В последние годы осознание этой угрозы привлекало к ней все большее внимание научных, общественных и правительственных кругов многих государств мира. Наряду с проведением специальных научных конференций, проблемы АКО рассматривались ООН (1995 г.), Палатой лордов Великобритании (2001 г.), Конгрессом США (2002 г.) и Организацией экономического сотрудничества и развития (2003 г.). Принят ряд резолюций, в том числе Резолюция Парламентской ассамблеи Совета Европы 1996 г. 1080 «Об обнаружении астероидов и комет, потенциально опасных для человечества». Современное состояние международной кооперации по проблеме АКО описано в главе 11.

## 1.5. Современное состояние исследований по проблеме АКО

*Заранее тут ничего нельзя сказать.*

*И это, конечно, как раз самое интересное.*

*А. Милн. «Винни-Пух и все-все-все»*

Что же нам известно о современном уровне угрозы? Прежде всего дадим некоторые определения. Под *объектами, сближающимися с Землей (ОСЗ)*, понимают астероиды и кометы, орбиты которых имеют перигелийные расстояния  $q < 1,3$  а.е. Среди них выделяют *потенциально опасные объекты (ПОО)*, под которыми понимают тела, чьи орбиты в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до минимального расстояния, не превышающего 0,05 а.е. (7,5 млн км). Основанием для того, чтобы считать тела на орбитах,

проходящих от Земли на расстояниях до 20 радиусов лунной орбиты, потенциально опасными, является то обстоятельство, что в таких пределах можно ожидать изменения расстояний между орбитами в обозримом будущем (на протяжении столетия) под влиянием планетных возмущений, а также в связи с ошибками определения элементов орбит. При весомой вероятности встречи астероида с Землей он считается *угрожающим*. К угрожающим можно условно отнести АСЗ, пролетающие мимо Земли на расстояниях, меньших среднего радиуса лунной орбиты.

Число известных ОСЗ и ПОО быстро растет. По данным НАСА на 1 июня 2010 г. было зарегистрировано 7083 объектов, сближающихся с Землей, в т. ч. 6998 астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и 85 комет. Из них потенциально опасных объектов – 1125. Из этого числа 145 ПОО имеют размер более 1 км.

Понятно, что столкновения с астероидами рассматриваются как более частые события. Только около 0,4 % тесных (до 0,2 а.е.) сближений известных объектов с Землей приходятся на периодические кометы. Шесть из двенадцати известных прошедших сближений активных комет с Землей до 0,102 а.е. приходились на периодические кометы (см. приложение 2). Поэтому доля тесных сближений активных комет с Землей (среди сближений всех тел) составляет около 1 %. Однако число неактивных («потухших») комет может быть значительно больше, чем активных. Неактивные кометы по своим наблюдаемым свойствам могут почти не отличаться от астероидов, так что к приведенной выше статистике нужно относиться, имея в виду это обстоятельство.

Динамика обнаружения АСЗ представлена на рис. 1.2. На графике хорошо видно, как резко возрос темп обнаружения АСЗ, начиная с 1998 г. Это связано с началом программы «Космическая стража».

Естественно, что наиболее развиты исследования по проблеме обнаружения ОСЗ в США, где работают несколько специализированных служб (LINEAR – Lincoln Near-Earth Asteroid Research, LONEOS – Lowell Observatory Near-Earth Object Search, NEAT – Near-Earth Asteroid Tracking, и Spacewatch) и ежегодно увеличивается финансирование на развитие работ по обнаружению, каталогизации, определению физических характеристик потенциально опасных объектов. Из международных проектов достойны упоминания австрало-американский проект Catalina Sky Survey (CSS), проект стран Европейского союза Asiago-DLR Asteroid Survey (ADAS). В других регионах осуществляются японский проект Japan Spaceguard Association (JSGA) и др.

Вклад российских обсерваторий, к сожалению, пока невелик. Он в первую очередь выражается в проведении исследований физических свойств астероидов, что весьма важно для планирования возможных методов противодействия столкновению, а также в слежении за уже

открытыми объектами и изучении источников их пополнения. Регулярные наблюдения астероидов в настоящее время проводятся в Пулковской обсерватории на автоматизированном телескопе с диаметром зеркала 32 см. Программы наблюдений астероидов, сближающихся с Землей, выполняются и в других обсерваториях. Отметим работу сотрудников Казанского университета на телескопе РТТ-150, установленном в Турции. Казанские коллеги не только проводят позиционные измерения астероидов, сближающихся с Землей, но и определяют массы избранных астероидов динамическим методом. Эпизодические программы наблюдений осуществляются в Институте солнечно-земной физики СО РАН и в Специальной астрофизической обсерватории РАН.

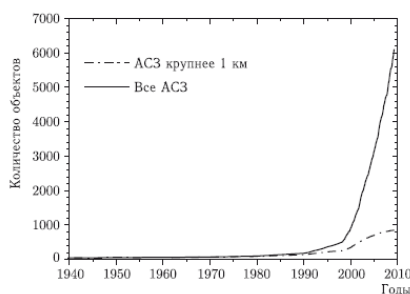


Рис. 1.2. Динамика обнаружения астероидов, сближающихся с Землей (по данным <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>)

Что касается тел класса метеороидов, то в течение последних 15 лет сотрудники Института астрономии РАН ведут регулярные наблюдения (на инструментах Звенигородской обсерватории, Симеизской обсерватории – ныне филиал Крымской астрофизической обсерватории, Терскольской обсерватории) избранных метеорных потоков с целью обнаружения тел размером в несколько десятков метров. То, что такие тела существуют, было установлено в 1995 г. Это открытие внесло существенные изменения в наши представления о степени угрозы столкновений с малыми телами (подробнее см. главу 5).

Радарные наблюдения ОСЗ (астероидов и комет) выполняются в основном в радиообсерваториях Голдстоун и Аресибо (США) в количестве 15–20 объектов ежегодно. Такие наблюдения исключительно важны как для уточнения орбит объектов, так и для моделирования их формы, вращения и других физических характеристик. В России и Украине проведены первые эксперименты по радарным и радиоинтерферометрическим наблюдениям астероидов (подробнее о методах и программах обнаружения и исследования малых тел см. в главе 6).

Обработка всей поступающей информации о наблюдаемых положениях объектов, присвоение предварительных обозначений объектам, идентификация объектов, определение предварительных орбит и их последующее уточнение в настоящее время полностью выполняются под контролем Центра малых планет (ЦМП), финансируемого НАСА и работающего под эгидой МАС (<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>). Центр также публикует информацию об объектах, которые нуждаются в дополнительных наблюдениях для подтверждения их открытия, уточнения орбит и других характеристик.

Прогнозирование движения ПОО, поиск их тесных сближений с Землей и получение оценки вероятности столкновений на протяжении ближайших десятилетий регулярно осуществляется в настоящее время в Лаборатории реактивного движения США (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>) и в Пизанском университете (Италия) (<http://newton.dm.unipi.it/gi-bin/peodys/>).

Конечно, при анализе известных данных о потенциально опасных объектах возникает наиболее существенный вопрос – сколько же неучтенных потенциально опасных объектов? Представляются разумными оценки: от  $2 \cdot 10^4$  (для тел размером более 140 м) и до  $10^6$  (для тел

крупнее 50 м). Сведения о ближайших *известных* прохождениях ПОО даны в приложении 1. Слово «известных» подчеркнуто специально, ведь, несмотря на очень значительный прогресс, мы пока еще слишком мало знаем об этом классе малых тел Солнечной системы. Можно сказать, что в силу ограниченности современных наблюдательных возможностей эти тела открываются практически по счастливой случайности.

Поскольку опасность столкновений с малыми телами все более серьезно осознается в наше время на различных уровнях – от профессионалов-ученых до правительств, естественно, встает вопрос о расширении возможных путей предотвращения угрозы. Разработка и создание методов и средств активного противодействия падению космических тел – важная составляющая в подходе к решению проблемы АКО. Выбор метода существенным образом зависит от размеров опасного тела и времени упреждения (времени, остающегося до столкновения). Собственно, таких методов два: уничтожение (дисперсия) угрожающего тела и увод его с угрожающей орбиты.

Мы считаем очевидным, что необходимо развивать все аспекты создания эффективной системы, позволяющей или отклонить, или уничтожить приближающееся к Земле опасное тело. Важнейшими научно-техническими задачами в плане решения проблемы АКО являются:

- организация всемирной сети обнаружения, мониторинга и изучения свойств потенциально опасных объектов;
- организация всемирной (глобальной) системы защиты Земли от этой опасности.

К возможности решения этих задач нас приближают достижения последних двух десятилетий, в том числе:

- проведены и проводятся работы по обнаружению и мониторингу небесных тел (астероидов и комет), которые могут столкнуться с Землей. Эти работы пока находятся в начальной стадии развертывания, но уже дали весьма важные результаты;
- сделаны существенные шаги по созданию системы контроля космического пространства – созданы и создаются средства, способные обнаружить опасные небесные тела (даже небольшие по величине) на подлете к Земле;
- совершенствуется ракетно-космическая техника, которая обеспечивает возможность полета космических аппаратов к малому небесному телу;
- созданы ядерные взрывные устройства, способные отклонить небесное тело от Земли или уничтожить его (в зависимости от размера угрожающего объекта). Так, тело размером 1 км и более невозможно разрушить, даже используя весь накопленный ядерный потенциал Земли.

Более детально вопросы развития методов противодействия освещены в главе 10.

Специфика проблемы активного противодействия состоит в том, что она не может решаться одной страной или группой стран. Это – международная проблема, затрагивающая интересы всех стран, которая может быть решена лишь при наличии международного соглашения в отношении предпринимаемых действий. Особенно чувствительным вопросом является применение ядерных взрывов как инструмента противодействия. Сегодня на вывод ядерного оружия в космос существует запрет. Но в некоторых ситуациях без этого инструмента при современном уровне технологий обойтись нельзя. Можно указать и на ряд других причин, по которым оказание активного противодействия падению космических тел должно стать предметом международного соглашения.

В главе 11 рассмотрены различные аспекты организации международной кооперации (разумеется, с участием России) по проблеме АКО.

## Глава 2

# Малые тела Солнечной системы

*...Я помню иногда  
Угасший метеор в пустынях мироздания,  
Седой кристалл в сверкающей пыли...*

*М. Волошин*

### 2.1. Классификация малых тел Солнечной системы

*О, пыль миров! О, рой священных пчел!  
Я исследил, измерил, взвесил, счел,  
Дал имена, составил карты, сметы...*

*М. Волошин*

Пространство Солнечной системы между планетами населено телами, чьи размеры сильно отличаются – от мельчайших пылинок до тысячекилометровых астероидов. Эти небесные тела называют малыми телами Солнечной системы. Как отмечалось в главе 1, их подразделяют, в зависимости от размера и свойств, на межпланетную пыль, метеороиды, астероиды и кометы. В разделе 1.1 приведены характерные границы размеров для каждого класса. В принципе, сближаться с Землей при своем движении в пространстве и даже падать на Землю могут любые малые тела. Но угрозу для Земли представляют только наиболее крупные из них. Например, метеороиды размером до 10 м можно считать малоопасными, если же определение метеороидов расширить до 100 м, то столкновения с такими телами, конечно же, становятся весьма опасными и проблему АКО нужно было бы называть астероидно-кометнометеороидной опасностью.

Различие между указанными типами обусловлено как природой этих тел, так и исторической традицией в их изучении. В этом разделе дадим очень краткое представление об этих телах (и карликовых планетах), более глубокое рассмотрение проводится в главах 3–5. Мы практически не рассматриваем в этом разделе, да и в целом в книге межпланетную пыль, поскольку ее роль в проблеме АКО ничтожна.

**Метеороиды.** Метеороидами называют малые тела, проявляющие себя при падении на Землю как метеоры и болиды, сгорающие в атмосфере. Такие падения наблюдаются как красивые явления, называемые «падающими звездами», а при массовом характере – «звездным дождем» (рис. 2.1). Размеры метеороидов, как правило, не превышают нескольких метров. Некоторые метеороиды долетают до поверхности Земли в виде метеоритов. Значительная часть метеороидов представляет собой довольно рыхлые тела, образующиеся в результате распада кометных ядер.

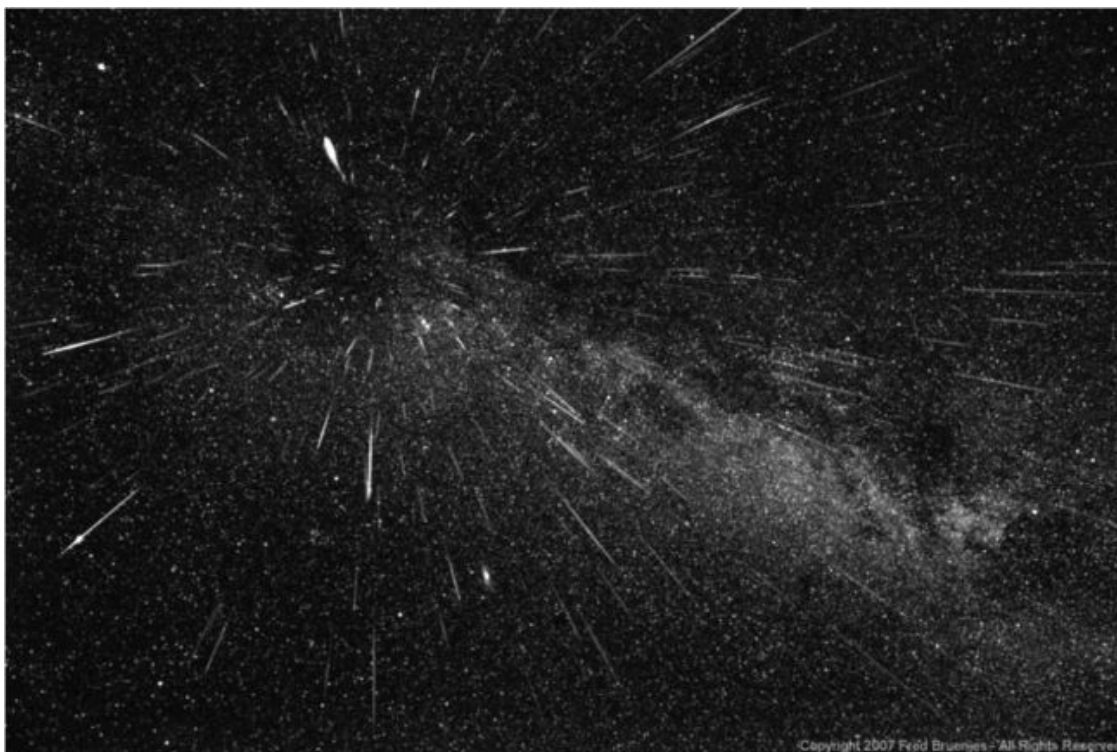


Рис. 2.1. Метеорный поток Персеиды (<http://www.moonglow.net/ccd/pictures/meteors/index.html>)

По динамическим характеристикам метеороиды разделяют на два класса: спорадические и метеороиды, образующие рои. Метеороидный рой – это множество частиц, двигающихся по близким в некотором смысле орбитам. Если метеороидный рой пересекается Землей, то при достаточно больших геоцентрических скоростях метеороидов и пространственной плотности роя мы наблюдаем явление метеорного потока. Наблюдения метеорных потоков – это практически единственный способ регистрации метеороидного роя по наземным наблюдениям. Начиная с открытия Дж. Скиапарелли, установившего сходство орбит метеорного потока Персеиды и кометы 1862 III, считается, что метеороидные рои образуются при разрушении ядер комет. (Подробнее см. в главе 5.)

**Астероиды.** Наиболее хорошо изученными среди малых тел Солнечной системы являются астероиды – малые планеты. История их исследования насчитывает более двух столетий. В ночь на 1 января 1801 г. Джузеппе Пиацци открыл первую малую планету, которая получила название Церера.

Орбиты практически всех астероидов располагаются между орбитами Марса и Юпитера и образуют Главный пояс астероидов (рис. 2.2). К настоящему времени открыто более 500 тыс. астероидов. Более чем для 200 тыс. астероидов надежно определены орбиты (такие астероиды получают свой номер, а затем и название). По имеющимся оценкам, в Главном поясе существует не менее миллиона астероидов размерами более 1 км.

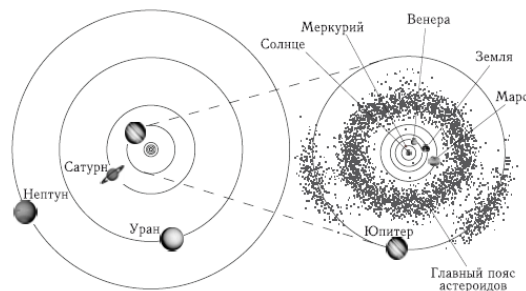


Рис. 2.2. Солнечная система и Главный пояс астероидов

В прошлые века астрономы, сохраняя древние традиции в названиях планет, присваивали малым планетам имена богов, как греко-римских, так и других. К началу XX в. на небе появились имена почти всех известных человечеству богов – греко-римских, славянских, китайских, скандинавских и даже богов народа майя. Открытия продолжались, богов стало не хватать, и тогда на небе стали появляться названия стран, городов, рек и морей, имена и фамилии реальных живых или живших людей. Неизбежным стал вопрос об упорядочении процедуры этой астрономической канонизации имен. Вопрос этот тем более серьезен, что, в отличие от увековечения памяти на Земле (названия улиц, городов и т. п.), имя астероида не может быть изменено. Каждый объект, будучи открыт и занесен в каталог, становится предметом изучения астрономов. Все данные об обнаружении и результатах наблюдений пересылаются в Центр малых планет (ЦМП). После того, как будут проведены многократные наблюдения астероида на интервале времени, превышающем период его обращения вокруг Солнца, ему присваивается постоянный порядковый номер. (Подробно о порядке нумерации см. в главе 3.)

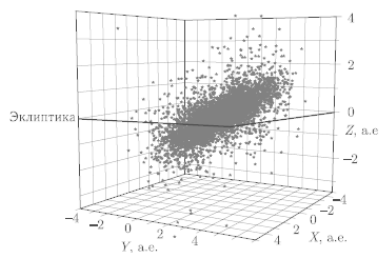


Рис. 2.3. Мгновенное положение астероидов в прямоугольной системе координат, основная плоскость – плоскость эклиптики

Большие полуоси орбит большинства астероидов заключены в пределах от 2,06 до 3,27 а.е., а среднее значение составляет 2,77 а.е. Средний эксцентриситет орбит всех пронумерованных малых планет – 0,14, средний наклон плоскости орбиты астероида к плоскости орбиты Земли –  $7,7^\circ$  (мгновенное положение астероидов см. на рис. 2.3). Скорость движения астероидов Главного пояса относительно Солнца – около 20 км/с, период обращения (астероидный год) составляет от 3 до 9 лет. Период собственного вращения астероидов (т. е. продолжительность суток на астероиде) в среднем составляет 7 часов.

**Кометы.** Кометы известны с глубокой древности. Это небесные тела, которые выглядят как туманные пятна и становятся все ярче и ярче по мере приближения к Солнцу, приобретая длинные и яркие хвосты. Кометы появляются на небе довольно редко и, как правило, неожиданно. Из-за необычного вида их считали предвестниками несчастий: голода, стихийных бедствий, эпидемий, войн или смерти правителя. Редкие случаи совпадений таких событий с появлениями комет запоминались надолго и лишь укрепляли веру в «зловредное» действие комет.

Кометы по своему виду очень индивидуальны, и «нормальной», типичной кометы не существует. Общим можно считать то, что на звездном небе комета видна в виде туманного пятна или хвостатой звезды (рис. 2.4). Кометы состоят из головы и хвоста (хвостов).



Рис. 2.4. Комета Хэйла – Боппа. Снимок получен на камере ВАУ Звенигородской обсерватории ИНАСАН (апрель 1997 г.)

*Голова кометы* – основная часть кометы, состоящая из комы и ядра кометы. Видимые размеры головы кометы достигают 2 млн км.

*Ядро кометы* – центральная часть головы кометы, в которой сосредоточена почти вся масса кометы. Размеры ядра кометы достигают нескольких десятков километров.

*Кома кометы* – сферическое газопылевое разреженное облако (туманная атмосфера), окружающее ядро кометы. Кома образуется при нагревании Солнцем ядра кометы.

*Хвост кометы* – протяженная и разреженная часть кометы, состоящая из пыли, газа и ионизованных частиц. Кометный хвост формируется из вещества комы, которое под давлением света и солнечного ветра отбрасывается в направлении от Солнца. Видимые размеры хвоста кометы достигают десятков миллионов километров.

Обычно комета обладает двумя хвостами: ионным хвостом и пылевым хвостом, изогнутым по отношению к орбите кометы и содержащим много пылевых частиц.

Подробнее о кометах см. в главе 4.

**Планеты-карлики.** Первые объекты, обнаруженные в районе орбиты Плутона и далее, так называемые «транснептуновые объекты», были невелики по размерам. Позднее астрономы обнаружили в этом поясе гораздо большие тела, такие как 136108 Хаумеа (экваториальный диаметр 1960 км) и 136472 Макемаке (около 1800 км). Крупнейший из известных на сегодня объектов – планетоид 136199 (2003 UB313), известен под именем Эрида. Его поперечник оценен в 2400 км, что превышает диаметр Плутона. На рис. 2.5 (см. вклейку) можно сравнить размеры карликовых планет и кандидатов в карликовые планеты с размерами Плутона.

24 августа 2006 г. в Праге после ожесточенных споров Генеральная ассамблея Международного астрономического союза (МАС) проголосовала за новое определение, которое автоматически лишило Плутон звания планеты, присвоенного ему тем же МАС в 1930 г. Согласно новому определению, планетой Солнечной системы считается тело: 1) вращающееся по орбите вокруг Солнца; 2) имеющее достаточную массу для того, чтобы сформировать под действием собственного гравитационного поля гидростатически равновесную фигуру (близкую к сферической); 3) «расчистившее» область в районе своей орбиты от более мелких объектов. Таким образом, в Солнечной системе стало всего восемь планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Тела, не удовлетворяющие третьему условию, но не являющиеся спутниками, теперь будут называть карликовыми планетами – к ним относят, например,

Плутон и Цереру. Все остальные тела, кроме спутников, называются малыми телами Солнечной системы. Это большинство астероидов, комет и объектов пояса Койпера, некоторые из них являются кандидатами в карликовые планеты.

## 2.2. Происхождение малых тел, их эволюционная взаимосвязь

*Какою ты стихией порожден?  
Все по одной отбрасывают тени,  
А за тобою вьется миллион  
Твоих теней, подобий, отражений.*

*У. Шекспир. Сонет 53*

В рамках стандартного сценария образования Солнечной системы формирование каменных и ледяных астероидов находит естественное объяснение – это своего рода остатки строительного материала планетной системы Солнца. На рис. 2.6 показаны стадии формирования нашей планетной системы из околосолнечного протопланетного диска.

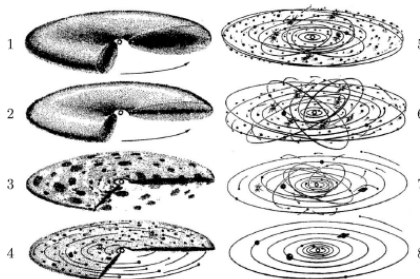


Рис. 2.6. Стандартная модель эволюции газопылевого допланетного диска около молодого Солнца [Левин, 1964; Витязев и др., 1990]

На этом рисунке слева сверху вниз показаны следующие фазы эволюции протопланетной системы: опускание пыли к центральной плоскости и образование пылевого субдиска (1); уплотнение пылевого субдиска (2); развитие гравитационной неустойчивости в нем и его распад на пылевые сгущения (3); сжатие пылевых сгущений и образования роя плотных тел астероидных размеров (4). Справа – объединение планетезималей в планеты: появление крупных тел (5); рост относительных скоростей планетезималей (6); ударный нагрев, сильный метаморфизм, плавление и испарение вещества и его реконденсация; диссипация газа из Солнечной системы и аккреция его на Юпитер и Сатурн, выброс планетами-гигантами малых каменно-ледяных тел на периферию Солнечной системы (образование облака Оорта) (7), завершение процесса формирования планет и спутниковых систем, пояса астероидов, образование тел пояса Койпера из вещества окраинных областей допланетного диска (8) [Левин, 1964; Витязев и др., 1990].

Длительности стадий согласно динамическим оценкам, подтвержденным позже космохронометрией, составляют:

- 1, 2 – ~ 100 000 лет
- 3, 4 – ~ 1 000 000 лет
- 5, 6 – ~ 10 000 000 лет
- 7, 8 – ~ 100 000 000 лет.

Сегодня Главный пояс астероидов, расположенный в области 2,5–3,7 а.е. и состоящий из нескольких крупных сфероидальных тел (Церера, Паллада, Юнона, Веста и др.) и множества «мелких» каменных, часто обломочного характера, тел, рассматривается как реликт эпохи формирования планет на границе планет земной группы и Юпитера («несостоявшаяся пла-

нета»). В этой зоне сохранилось не более нескольких процентов первичного твердого вещества. Наблюдаемый градиент состава так называемых астероидов типа

«S», «C», «M» и т. д. (подробнее см. главу 3) указывает либо на неполное перемешивание в этой зоне, либо (что менее вероятно) на особенности поздней конденсации на поверхности сформировавшихся тел.

Кометные ядра – своего рода «ледяные астероиды» – образовались в районе планет-гигантов, по-видимому, вследствие гравитационной неустойчивости субдиска «грязной ледяной пыли» и так же, как первичные каменные сгущения, прошли через стадии коагуляции, уплотнения и дробления. С ростом массивных тел в зоне планет-гигантов относительные скорости тел возросли настолько, что эксцентриситеты и наклоны орбит тел достигли критических значений  $\sim 1/3$ , что, наряду с прохождением звезд вблизи формирующейся Солнечной системы, приводило к выбросу их на периферию системы и формированию облака Оорта (см. рис. 2.7 на вклейке).

В настоящее время довольно распространено мнение, что тела километровых размеров, которые принято называть планетезималиями, образуются в результате объединения более мелких тел при столкновениях. Это относится и к каменным телам в поясе астероидов, и к ледяным телам на периферии Солнечной системы [Weidenschilling, 1997]. Однако имеющиеся экспериментальные данные о слипании пылевых частиц в условиях очень разреженного газа (при давлениях  $\leq 10^{-3}$  бар), характерных для протопланетного диска, показывают, что вероятность слипания резко падает с увеличением размеров частиц. Альтернативный механизм образования планетезималей в транснептуновой области – гравитационная неустойчивость плотного слоя мелких тел (дециметровых и меньших размеров), сформировавшегося в средней плоскости газопылевого протопланетного диска, окружавшего молодое Солнце. Работы [Сафронов, 1994; 1996] и [Макалкин, Зиглина, 2003] позволили оценить характерные времена образования планетезималей, их характерные размеры и сделать некоторые выводы об их структуре.

В целом можно считать, что существующие эволюционные модели околозвездных газово-пылевых дисков объясняют ранние стадии формирования планетных систем. Малые тела играли важнейшую роль, более того, многие из них несут в себе информацию о первичных условиях процесса планетообразования.

Согласно современным представлениям, образование планет начинается в центре протопланетного диска и со временем распространяется на его периферию, очищая окрестности звезды от пыли. Есть наблюдательные подтверждения этого. Так, исследование инфракрасного спектра звезды типа Т Тельца (ТВ Гидры) с возрастом  $10^7$  лет показало, что пыль в околозвездной зоне с радиусом около 4 а.е. отсутствует [Calvet et al., 2002]. Согласно этой работе, расстояние в 4 а.е. совпадает с ожидаемым размером зоны, в которой успели сформироваться планеты в протяженном (около 100 а.е.) пылевом диске, окружающем эту звезду. Если принять массу звезды равной массе Солнца, а массу диска равной 0,06 массы Солнца, то положение «фронта» активного планетообразования оказывается совпадающим с положением Плутона, который являет собой пример планеты на стадии формирования. За фронтом планетообразования расположен протяженный пылевой диск, во внутренних

частях которого встречаются планетезималии с размерами в сотни километров – непосредственный строительный материал для будущих планет.

Процесс планетообразования в околозвездных газово-пылевых дисках, подобных тому, что существовал в протосолнечной окрестности, формирует околозвездную планетную систему с радиусом 40–50 а.е., окруженную протяженным (в несколько сотен а.е.) газово-пылевым диском. Действительно, планетные системы, обнаруженные к настоящему времени в окрестностях Солнечной системы, как правило, обнаруживают в инфракрасном диапазоне спектра протяженные пылевые диски такого размера. Естественно, что на границе этих областей имеется много протопланетных тел с размерами от нескольких километров до тысячи

километров, называемых в Солнечной системе астероидами, хотя в их состав входит большое количество летучих веществ, что роднит их по составу с ядрами комет. Эта дискообразная зона в Солнечной системе получила название «пояс Койпера».

Облако Оорта в настоящее время представляет собой «резервуар комет» из объектов с перигелийными расстояниями, большими 30 а.е., и большими полуосями, превышающими несколько тысяч астрономических единиц. До самого последнего времени объекты облака Оорта были доступны обнаружению только в перигелиях их орбит. Предпринимаются попытки обнаружения этих объектов на границах облака Оорта по затмению ими звезд фона [Cooray, 2003].

## 2.3. Связь и различия между малыми телами

*Порой в великой книге тайн природы  
Мне удастся кое-что прочесть.*

*У. Шекспир. «Антоний и Клеопатра»*

Как было отмечено ранее, согласно общепринятой гипотезе, кометы являются остатками протопланетного вещества, не вошедшего в состав планет. Считается, что облако Оорта на окраине Солнечной системы – это «склад» кометных ядер. Возмущения от близко проходящих к Солнцу звезд или газопылевых скоплений преобразуют отдельные орбиты ядер комет из облака Оорта в орбиты, проходящие вблизи больших планет. Большие планеты могут еще сильнее изменить орбиты и направить ядра внутрь планетной системы.

Метеороиды образуются при разрушении ядер комет и астероидов. Однако вполне вероятно, что незначительная часть современной популяции метеороидов была выброшена со спутников больших планет, с Меркурия или Марса. Нельзя исключить и возможность попадания в Солнечную систему метеороидов из других звездных систем.

Распад ядер комет в окрестности перигелия – наиболее вероятный путь образования метеороидного роя. Конечно, возможно образование роя и при катастрофических процессах: разрушении ядра кометы под действием приливных, центробежных или иных сил и при возможных столкновениях с астероидами или крупными метеороидами, но эти процессы представляются менее эффективными.

Существование метеорных потоков, связанных с астероидами Гермес (1937 UB), (1862) Аполлон и (2101) Адонис, было выявлено немецким астрономом К. Гоффмейстером в 1948 г. Новые взаимосвязи метеороидных роев с кометами и астероидами, выявленные в последнее десятилетие, а также исследования физических и динамических свойств малых тел позволяют лучше понять их природу и процессы, происходившие и происходящие в настоящее время в Солнечной системе. Надо иметь в виду, что эволюционные процессы могут уничтожить информацию о деталях процесса образования метеороидного роя.

Несомненно, что при столкновениях астероидов между собой, а также с метеорными телами происходит их разрушение, и часть вещества в виде пыли и более крупных осколков продолжает существовать самостоятельно, двигаясь вокруг Солнца по различным орбитам.

В начале XX в. К. Хираяма [Hirayama, 1918] обратил внимание на группирование некоторых астероидов Главного пояса по так называемым собственным элементам орбит, т. е. элементам орбит, откорректированным с учетом влияния вековых планетных возмущений. С этой точки зрения семейства Хираямы можно назвать роями астероидов. Считается, что эти семейства образовались в результате разрушительных столкновений в Главном поясе астероидов.

В 1989 г. инфракрасный астрономический спутник IRAS зарегистрировал пылевые пояса, связанные с семействами астероидов Хираямы. На этом основании можно утверждать, что астероиды способны производить и много мелких частиц, т. е. образовывать метеороидные рои.

Некоторые метеорные и болидные потоки могут иметь астероидное происхождение и служить потенциальным источником метеоритов. Для большинства метеорных потоков были вычислены распределения метеорных тел по массам в зависимости от расстояния до радианта потока. Эти данные свидетельствуют о том, что некоторые метеорные потоки вполне могут содержать крупные тела, которые могли бы породить такое явление, как Тунгусский метеорит, т. е. иметь размеры в несколько десятков метров.

Среди метеороидов, ставших метеоритами, преобладают каменные, они составляют примерно 92,8 % падающих на Землю метеоритов; 5,7 % – железные, а остальные 1,5 % – железно-каменные.

При сравнении астероидов и комет возникает вопрос – в чем же принципиальная разница? Можно рассматривать кометную активность как явление испарения вещества с поверхности тела. Если в момент обнаружения объект проявляет кометные свойства, то это тело считается кометой и ему дается имя первооткрывателей; если же в этот момент тело уже (или еще) не проявляло кометных свойств, то дается предварительное обозначение, как для астероида. Впоследствии объект может поменять свой статус и оказаться астероидом, проявляющим кометные свойства (в каталогах уже есть примеры таких объектов).

## 2.4. Миграция малых тел в Солнечной системе

*В пространстве мировом, среди метеоритов,  
Обильных никелем, железом, как руда,  
Среди загадочных чужих для нас хондритов  
Извечно носятся, блуждая, глыбы льда.*

.....  
*Порой одни из них в бессмертности движения  
Скрестят свои пути с орбитой земной.*

*П. Драверт*

Все малые тела Солнечной системы мигрируют, изменяя свои первоначальные орбиты под воздействием других тел. Поэтому можно привести лишь «мгновенный» снимок Солнечной системы, указав все известные нам объекты и области их возможного движения. Например, на рис. 2.8 (см. вклейку) приведен «мгновенный снимок» внутренней части Солнечной системы. На ряде сайтов, включая <http://www.cfa.harvard.edu>, можно найти анимации, на которых демонстрируется движение малых тел Солнечной системы (разумеется, ускоренно). Даже на такой схематической анимационной картине видно, насколько сложными и разнообразными могут быть орбиты. В реальности картина намного сложнее, поскольку орбиты не являются неизменными, а могут испытывать (иногда очень сильные) изменения. Если такие изменения достаточно существенны, они приводят к миграции.

За время своего существования орбита малого тела претерпевает сильные изменения, особенно в том случае, если имеются близкие прохождения вблизи планет. Динамика малых тел описана в главах 3, 4 и 7.

Астероиды из Главного пояса могут мигрировать к Солнцу, испытывая на своем пути тесные сближения с планетами. Считается, что основной причиной появления астероидов, сближающихся с Землей, являются люки Кирквуда (см. главу 3). У орбиты астероида, попавшего в такой люк, начинает увеличиваться эксцентриситет, и она начинает пересекать орбиту Марса, а затем и орбиты других планет. Соответственно, при этом астероид перестает принадлежать Главному поясу.

Процесс миграции комет более масштабен, чем астероидов. Орбиты комет, вброшенные в планетную область из облака Оорта под действием звездных и галактических возмущений, с начальными большими полуосями в десятки тысяч астрономических единиц могут преобразовываться в орбиты с большими полуосями в несколько астрономических единиц. В околоземном пространстве соответствующие объекты регистрируются как короткопериодические кометы. Результаты численного моделирования процесса миграции показывают, что короткопериодические кометы могут происходить как из облака Оорта, так и из транснептуновой области. В настоящее время открыто много объектов, находящихся в промежуточной стадии процесса миграции комет из внешней части Солнечной системы в околоземное пространство, — так называемые кентавры. Эти малые тела движутся в межпланетном пространстве за орбитой Юпитера. Более подробно процесс миграции комет рассматривается в главе 4.

## 2.5. Свидетельства столкновений малых тел с планетами, их спутниками и между собой

*Увы, я был лучшего мнения об этом светиле. Оказывается, оно щербатое, с изъеденными краями, как поднос последнего поденищика.*

*Л. Лагин. «Старик Хоттабыч»*

Столкновение малых тел Солнечной системы с твердой поверхностью планет и их спутников приводит к образованию на ней ударных кратеров. Со временем на поверхности, первоначально свободной от кратеров, возникает все большее число кратеров. Современные популяции кратеров на участках поверхностей, таких, например, как лунные возвышенности или моря, являются результатом длительной метеоритной бомбардировки. Кратеры сильно варьируются по размеру, часть из них – относительно молодые кратеры с четкими валами, протяженными светлыми лучами, в то время как другие кратеры имеют разную степень деградации. На некоторых безатмосферных телах, таких, например, как Луна, главный фактор деградации – новые удары. На прочих телах Солнечной системы действие атмосферы, воды и тектонических процессов типа субдукции уничтожает кратеры за короткий промежуток времени после их образования. Это приводит к ландшафтам, близким к земным.

**2.5.1. Кратеры на Земле.** Начиная со второй половины XIX в. в штате Аризона в США известен кратер Каньон дьявола (он же кратер Метеор, кратер Бэрринджера, Аризонский метеоритный кратер; см. рис. 2.9 на вклейке). Его диаметр 1240 м, а глубина – 170 м. Ранее существовали разные гипотезы о его происхождении: одни считали кратер вулканическим, другие – результатом взрыва водяного пара, третьи принимали его за карстовый провал. У индейцев, коренных жителей Аризоны, существовала легенда о том, что некогда огненный бог на огненной колеснице спустился на землю, и кратер – место его «приземления». В 1906 г. геолог Д. Бэрринджер доказал, что Аризонский кратер имеет ударное, а не вулканическое происхождение. При многочисленных исследованиях было найдено около 12 т метеоритного вещества. Кратер возник около 50 тыс. лет назад в результате падения на Землю железоникелевого метеорита диаметром около 60 м со скоростью 20 км/с. Энергия взрыва при образовании кратера оценивается в 10–20 мегатонн тринитротолуола. Аризонский кратер далеко не единственный метеоритный кратер, обнаруженный на поверхности Земли.

Ударные кратеры большего размера сначала воспринимались не как результат столкновения небесного тела с Землей, а как нечто совершенно иное. Начиная с первого исследования В. Бушером кратера Серпент-Маунд диаметром 6 км (штат Огайо, США), причиной образования таких кратеров признавался взрыв, но единственным известным источником взрыва считался вулканизм. Поскольку ни в самом кратере, ни в его окрестностях не было обнаружено никаких следов вулканизма, то этому феномену было дано название «криповулканизм» (т. е. скрытый вулканизм). Бушер и другие геологи описали много «криповулканических» кратеров, таких как Штайнхайм (Германия), Флин-Крик и Сьерра-Мадера (США), Вредефорт (ЮАР) и другие.

В 1936 г. Дж. Бун и К. Албриттон выдвинули предположение о том, что «криповулканические» структуры – это «шрамы» древних метеоритных ударов. Во всех этих кратерах были обнаружены следы ударных волн в породе и минералы, способные образоваться только при очень высоких давлениях (такие как коэсит, стишовит и т. п.). При вулканических взрывах подобные образования невозможны.

К настоящему времени на поверхности Земли известно около 200 больших ударных кратеров – их называют астроблемами («звездые раны»). Наибольшие из них имеют диаметр до 200 км. Далеко не вся поверхность Земли обследована, особенно дно океанов. Даже на поверхности суши могут быть открыты многочисленные новые кратеры и астроблемы. Более подроб-

ное описание кратеров и последствий падения тел на Землю дано в главах 8 и 9; в приложении 6 приводится каталог ударных кратеров.

**2.5.2. Кратеры на Луне.** Вся поверхность Луны испещрена кратерами (рис. 2.10). Только на видимой с Земли половине поверхности Луны известно около 300 тысяч лунных кратеров с поперечным размером 1 км и более, в том числе почти 15 тысяч кратеров диаметром свыше 10 км. Можно сказать, что изучение лунных кратеров началось в 1609 г., когда Галилео Галилей направил свой первый телескоп на Луну и увидел там круглые «пятна». Первые рассуждения о природе лунных кратеров сделаны Робертом Гуком в его книге «Микрография», опубликованной в 1665 г. Гук сравнил лунные кратеры с ямками на поверхности кипящего алебаstra и предположил, что кратеры образовались в результате вулканической активности. Гук рассматривал также ударное происхождение кратеров. Однако в то время космическое пространство считалось пустым, и Гук отверг ударную гипотезу, поскольку не мог себе представить, откуда могут взяться тела, ударяющие по поверхности Луны. Истинная – метеоритная – природа кратеров на Луне была выявлена лишь в 1924 г. А. Гиффордом.

Начиная с 1959 г. к Луне было совершено более 50 полетов космических аппаратов. В результате на поверхности Луны выявлены кратеры размерами от нескольких сантиметров до более чем 1000 км. Составлена подробная карта всей ее поверхности. Оказалось, что молодых кратеров на обратной стороне Луны почти в два раза больше, чем на видимой. Кроме того, именно на обратной стороне Луны располагаются гигантские ударные бассейны, такие как безымянный полукольцевой бассейн рядом с Морем Восточным (диаметром около 1100 км), кратеры Герцшпрунг (645 км), Королев (525 км) и Аполлон (485 км).



Рис. 2.10. Поверхность Луны ([www.astrosurf.com/cidadao/moon\\_obs.htm](http://www.astrosurf.com/cidadao/moon_obs.htm))

Кратеры на поверхности спутников планет имеют диаметры до  $1/3$  диаметра спутника. При скорости астероида  $20$  км/с при столкновении со спутником планеты объем кратера может составить до  $1500$  объемов астероида. Скорости выброса вещества спутника из кратера относительно невелики, и может образоваться рой частиц с орбитой, близкой к спутнику. При более высоких скоростях столкновения осколки с поверхности спутника, преодолев гравитационное притяжение спутника, могут быть выброшены внутрь Солнечной системы.

**2.5.3. Кратеры на Меркурии.** Начиная с 1973 г. с пролетной траектории космического аппарата «Маринер-10» была сфотографирована почти вся поверхность Меркурия с разрешением до  $100$  метров. Это позволило увидеть Меркурий примерно так же, как Луну в большой телескоп с Земли (рис. 2.11). Обилие кратеров – наиболее очевидная черта его поверхности, которую по первому впечатлению даже специалисты-селенологи приняли за поверхность Луны. Действительно, морфология кратеров близка к лунной, их ударное происхождение не вызывает сомнения. Но в целом меркурианские кратеры по сравнению с лунными менее глубокие, что, очевидно, объясняется различием ускорения силы тяжести.



Рис. 2.11. Поверхность Меркурия (<http://pds.jpl.nasa.gov/planets/images/browse/mercury/>)

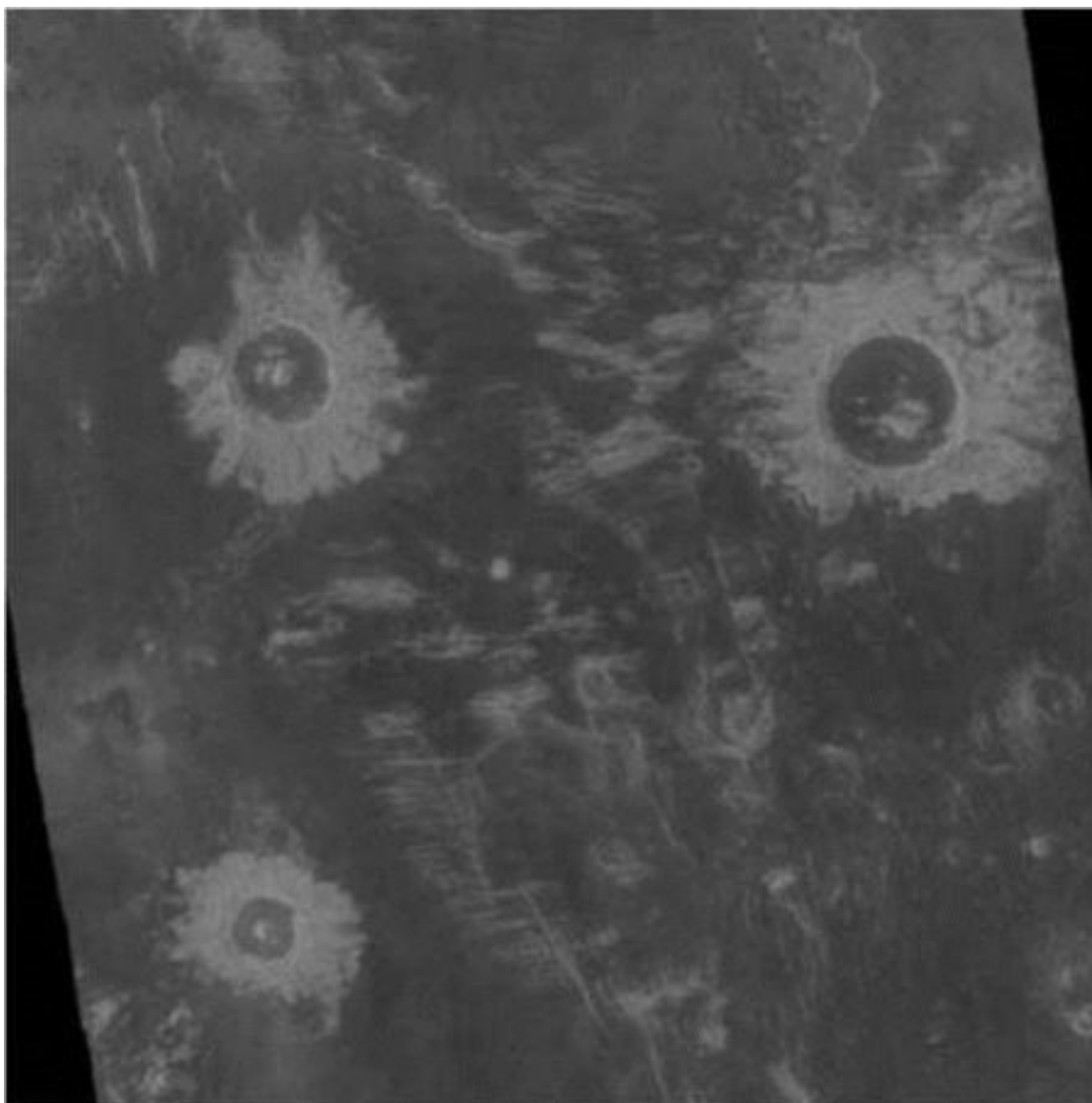


Рис. 2.12. Поверхность Венеры (<http://pds.jpl.nasa.gov/planets/captions/venus/>)

**2.5.4. Кратеры на Венере.** Венера окружена очень плотной атмосферой; ее плотность почти в 100 раз превышает плотность атмосферы Земли. Атмосфера Венеры непрозрачна и не позволяет увидеть какие-либо детали ее поверхности в оптическом диапазоне. Защитная роль ее атмосферы от внешнего (космического) воздействия подобна водному океану глубиной 1 км или слою скальных пород мощностью 300 м. Облик поверхности Венеры, выявленный с помощью космических аппаратов «Венера-15» (рис. 2.12), «Венера-16» и «Пионер-Венера», резко отличается от облика Меркурия. На Венере очень мало кольцевых кратерных структур. На территории 115 млн км<sup>2</sup>, снятой радарной съемкой с высоким разрешением, выявлено всего около полутора сотен кратеров с поперечным размером до 150 км. Но глубина этих кратеров очень мала (несколько сотен метров). Мелкие кратеры с размерами менее 8 км отсутствуют. В связи с тем, что разрешающая способность радарных измерений низка, нельзя сделать окончательного вывода о соотношении вулканизма и космической бомбардировки в формировании ландшафта Венеры.

**2.5.5. Кратеры на Марсе.** Планета Марс имеет довольно прозрачную и очень разреженную атмосферу, что позволяет видеть поверхность Марса в телескоп с Земли. Детали поверхности Марса изучались в течение столетий. Большая часть марсианской поверхности

покрыта яркими областями красно-оранжевого цвета. Имеются также темные образования – их называли марсианскими морями. Наблюдавшие Марс астрономы иногда видели слабые полосы или линии, пересекающие поверхность. Итальянский астроном Дж. Скиапарелли в 1877 г. нанес на карту эти линии и назвал их «каналами». Наличие каналов породило легенду о существовании марсианской цивилизации. Первые снимки Марса, полученные с космических аппаратов в середине 1960-х гг., показали, что его поверхность изобилует кратерами, в большинстве своем сильно разрушенными и немного напоминающими лунные. Большая часть марсианских кратеров имеет ударное происхождение, хотя имеются и вулканические кратеры. Ударные кратеры (см. рис. 2.13 на вклейке), как правило, имеют следы выглаживания. В целом кратеры на Марсе более мелкие, чем на Луне или Меркурии, но значительно более глубокие, чем на Венере.

Подтверждением того, что в прошлом происходили столкновения малых тел с Марсом, являются находки на Земле метеоритов с Марса (см. рис. 2.14 на вклейке). Расчеты показывают, что только при таких столкновениях возможны выбросы марсианского вещества со скоростями, достаточными для того, чтобы покинуть эту планету.

**2.5.6. Кратеры на астероидах.** Практически все детальные фотографии астероидов служат прямым доказательством падения на них небесных объектов. Например, карта астероида Веста (диаметр астероида 500 км) была сделана на основе снимков, полученных космическим телескопом им. Хаббла (см. рис. 2.15 на вклейке). На карте видно, что на поверхности выделяется кратер протяженностью во всю длину астероида. Этот огромный кратер находится в нижней части изображения. Исследования показали, что астероид Веста испытал мощное разрушительное соударение около миллиарда лет назад.



Рис. 2.16. Астероид Итокава (<http://galspace.spb.ru/>)

Еще один пример – астероид (25143) Итокава (рис. 2.16). Этот астероид является одним из довольно подробно исследованных астероидов [Hirata et al., 2009; Barnouin-Jha et al., 2008; Cheng and Barnouin-Jha, 2007]. Орбита астероида находится между орбитами Марса и Земли. Этот астероид был выбран объектом исследования зонда «Хаябуса» и впоследствии получил свое современное название по имени основателя японской космической программы профессора Хидэо Итокавы. Астероид Итокава относится к астероидам класса S(IV) (см. главу 3). Длина астероида составляет 548 м, средняя плотность –  $2,1 \text{ г/см}^3$ .

Астероид вращается вокруг оси с периодом 12,32 ч, имеет неправильную форму, его можно рассматривать как состоящий из двух частей. На его поверхности можно выделить 2 типа ландшафта: пересеченную местность, покрытую большим количеством камней и валунов, и ровные реголитовые равнины у «перешейка». На Итокаве обнаружено более десятка ярко выраженных ударных структур круговой формы. Одной из крупнейших является Малая Вумера диаметром около 50 м. Большинство кратеров малого размера заполнены пылью и по внешнему виду напоминают «пруды», обнаруженные на поверхности астероида Эрос. Главной особенностью Итокавы является наличие очень большого количества камней и валунов. Всего было выявлено более 1000 валунов размерами более 5 м, а максимальный размер некоторых

глыб достигает  $\sim 50$  м. С помощью рентгеновского спектрометра, установленного на аппарате «Хаябуса», удалось исследовать состав астероида, четко идентифицировать линии Mg, Si, Al.

Краткое описание основных типов малых тел Солнечной системы, составляющее содержание этой главы, позволяет сделать несколько выводов. Во-первых, имеющиеся знания о происхождении и миграции малых тел все еще фрагментарны, а гипотезы не стали теориями. В некоторых областях исследования только начинаются. Во-вторых, хотя мы уже определенно понимаем, что все популяции опасных космических объектов динамичны и непрерывно пополняются, но механизмы такого пополнения изучены пока недостаточно. Наконец, едва ли возможно полностью каталогизировать всю популяцию малых тел, особенно комет и крупных метеороидов.

## Глава 3

### Астероиды

*Зевс молнией разбил колесницу...  
По всему небу разбросаны осколки колесницы...  
А Фаэтон... пронесся по воздуху,  
подобно падающей звезде,  
и упал в воды реки Эридана...*

*Н. А. Кун. «Легенды и мифы Древней Греции»*

### 3.1. Историческое введение

*Точки-пятнышки на пластинке  
Да полосчатый пестрый спектр...  
Крохи света, миров искринки...  
Что ты ищешь в них, человек?!*

*А. Соловьев*

В данной главе рассмотрены сведения об астероидах как об источнике астероидно-кометной опасности.

Наряду с кометами и метеороидами, астероиды, или малые планеты, относят к малым телам Солнечной системы. В отличие от больших планет, известных с глубокой древности, история их открытия и изучения едва превышает двести лет. Иоганн Кеплер, открывший законы движения планет, в самом конце XV в. обратил внимание на непропорционально большое расстояние между орбитами Марса и Юпитера по сравнению с расстояниями между орбитами других известных в то время планет. Он заподозрил существование в этом месте неизвестной планеты. В середине XVIII в. сначала И. Тициус, а затем И. Боде сформулировали правило планетных расстояний, согласно которому расстояния от планет до Солнца возрастают в определенной закономерности. В соответствии с ней в промежутке между Марсом и Юпитером на расстоянии 2,8 а.е. от Солнца должна была существовать планета. После открытия в 1781 г. У. Гершелем ранее неизвестной планеты Уран, расположенной за Сатурном на расстоянии от Солнца, соответствующем правилу Тициуса – Боде, уже мало кто сомневался в его справедливости. Убежденность была столь велика, что осенью 1800 г. решено было организовать отряд «небесной полиции» для поимки неизвестной планеты.

Но реальные события опередили планы. В ночь на 1 января 1801 г. сицилианский астроном Дж. Пиацци, до которого известие о его включении в состав «небесной полиции» еще не успело дойти, обнаружил на небе новое небесное тело, которое не значилось в выверяемом им звездном каталоге. Перемещение тела относительно звезд указывало на его принадлежность к Солнечной системе, и Пиацци решил, что он открыл новую комету. Но дальнейшие наблюдения показали, что «комета» не обнаруживает характерной для этого типа тел туманной оболочки (комы). Пиацци стал догадываться, что он открыл нечто более значительное. Он продолжал наблюдения за новым телом до 10 февраля, после чего прекратил их по причине болезни. Посланные им сообщения другим астрономам о новом открытии достигли их с опозданием из-за военных действий в Италии. Время было упущено, и тело уже стало невозможно наблюдать из-за того, что оно приблизилось к Солнцу до малого углового расстояния.

Между тем, первые же попытки определить орбиту нового тела по наблюдениям Пиацци показали, что оно движется на среднем расстоянии от Солнца около 2,8 а.е., что в точности

соответствовало значению большой полуоси для неизвестной планеты согласно правилу Тициуса – Боде. Недостающая планета была открыта и тут же потеряна! Предстояло вновь охотиться за ней после того, как она станет доступной для наблюдений уже по другую сторону Солнца. Задача предвычисления положения планеты по наблюдениям Пиаци была блестяще решена молодым математиком и астрономом К. Ф. Гауссом, который разработал с этой целью метод определения орбиты по трем положениям небесного тела. По вычисленной Гауссом эфемериде потерянная планета была вновь найдена, спустя ровно год после ее открытия.

Пиаци назвал открытую им планету *Ceres Ferdinandea* (Церера Фердинандова) в честь древнеримской богини, небесной покровительницы Сицилии Цереры и короля Неаполитанского и Сицилии Фердинанда, но исторически за новой планетой закрепилась только первая часть имени.

Сопоставляя блеск Цереры и расстояние до нее с этими величинами для других планет, можно было заключить, что ее размеры много меньше, чем у прочих известных планет. Но закон планетных расстояний не накладывал ограничений на их размеры. Главное, что «пропущенная» планета была найдена и порядок в Солнечной системе восторжествовал. Но уже через три месяца после повторного обнаружения Цереры немецкий астроном Г. Ольберс открыл еще одну планету, названную Палладой, которая, по вычислениям Гаусса, двигалась по орбите на расстоянии от Солнца, очень близком к орбите Цереры, но имела большой наклон орбиты к эклиптике. Ольберс высказал догадку, что обе планеты являются обломками одной некогда существовавшей планеты, распавшейся на части по какой-то причине. Это предположение, казалось, получило подтверждение, когда в 1804 г. немецкий астроном К. Гардинг, а в 1807 г. сам Ольберс открыли еще две небольшие по размеру планеты – Юнону и Весту, орбиты которых также располагались между Марсом и Юпитером.

По предложению Гершеля, вновь открытые тела стали называть астероидами, то есть звездopodobными, поскольку в телескопы невозможно было рассмотреть у них характерные для планет диски, но наряду с этим в научной литературе для нового класса тел Солнечной системы продолжали использовать термин «малые планеты».

Только через 38 лет была открыта следующая по счету малая планета – Астрея. Но после нее новые малые планеты стали открывать практически ежегодно. Этому способствовало появление новых более точных и более подробных звездных карт. К 1850 г. было открыто уже 13 малых планет, движущихся в той же области пространства между Марсом и Юпитером. Открытие новых планет привлекало много внимания астрономов и широкой публики, их тщательно и подолгу наблюдали, орбиты вычислялись по большому числу наблюдений. Открытые планеты сразу получали имена. Но уже с середины XIX в. новым планетам стали присваивать сначала порядковые номера, а затем уже названия. По мере того как число открытий росло, следить за малыми планетами становилось все труднее. В 1869 г. открытая малая планета впервые оказалась потерянной, так как для нее не сумели вычислить орбиту из-за недостаточного количества наблюдений. Впоследствии такие случаи стали повторяться все чаще и чаще. Особенно они участились после 1891 г., когда для наблюдений малых планет стал применяться фотографический метод. Количество обнаруживаемых новых тел вследствие этого резко возросло и следить за всеми оказалось практически невозможно. Ввиду этого вновь открытым телам стали присваивать сначала лишь предварительные обозначения и лишь потом, если удавалось продолжить наблюдения и определить орбиту, планета получала номер.

До 1925 г. не существовало общепринятой системы предварительных обозначений малых планет, что вносило путаницу при использовании наблюдений. В 1925 г. Э. Боуэр предложил систему предварительных обозначений малых планет, которая используется до наших дней. Остановимся на ней подробнее.

**Обозначение астероидов.** Предварительное обозначение состоит из номера года открытия малой планеты и двух букв латинского алфавита, которые могут сопровождаться однозначным или многозначным индексом. Первая буква соответствует номеру «полумесяца», в котором произошло открытие. Так, планеты, открытые с 1 по 15 января, имеют в предварительном обозначении первую букву А, планеты, открытые с 16 по 31 января, имеют первую букву В и т. д. Так как число полумесяцев в году равно 24, а в латинском алфавите 26 букв, то принято в предварительных обозначениях в качестве первой буквы не использовать буквы I и Z (табл. 3.1).

Вторая буква предварительного обозначения присваивается планете в порядке открытия в данном полумесяце (точнее говоря, в порядке поступления сообщения об ее открытии в центр, ведающий присвоением предварительных обозначений малым планетам). При этом исключается только буква I. Таким образом, 25-я малая планета, открытая во второй половине сентября 2004 г., получила предварительное обозначение 2004 SZ. Дальнейшие 25 открытий в данном полумесяце получили предварительные обозначения, в которых вторая буква снова пробегает значения от А до Z (исключая I), но теперь она сопровождается индексом 1.

Если число открытий превышает 50, то вторая буква кода опять циклически меняется, но теперь она сопровождается индексом 2 и т. д. В настоящее время, когда в течение полумесяца предварительные обозначения могут получить несколько тысяч объектов, нередко встречаются предварительные обозначения, в которых вторая буква сопровождается трехзначными индексами, например 2002 T C<sub>302</sub> (часто пишут T C302).

Таблица 3.1. Кодировка предварительных обозначений малых планет в зависимости от времени их открытия

Буква	Интервал	Буква	Интервал	Буква	Интервал
A	Январь, 1–15	J	Май, 1–15	R	Сентябрь, 1–15
B	Январь, 16–31	K	Май, 16–31	S	Сентябрь, 16–30
C	Февраль, 1–15	L	Июнь, 1–15	T	Октябрь, 1–15
D	Февраль, 16–29	M	Июнь, 16–30	U	Октябрь, 16–31
E	Март, 1–15	N	Июль, 1–15	V	Ноябрь, 1–15
F	Март, 16–31	O	Июль, 16–31	W	Ноябрь, 16–30
G	Апрель, 1–15	P	Август, 1–15	X	Декабрь, 1–15
H	Апрель, 16–30	Q	Август, 16–31	Y	Декабрь, 16–31

**Наблюдение астероидов.** Периодом, наиболее удобным для наблюдения обычной малой планеты, орбита которой располагается между орбитами Марса и Юпитера, является ближайшая по времени окрестность ее оппозиции с Солнцем, когда геоцентрические долготы планеты и Солнца различаются на 180°. В окрестности оппозиции малая планета оказывается на минимальном в данном году расстоянии от Земли и потому ее блеск максимален. Угол фазы (угол между направлением из центра планеты на Солнце и на Землю) при этом близок к минимальному, и планета кульминирует около полуночи. По мере увеличения углового расстояния планеты от точки оппозиции в обе стороны условия для наблюдений постепенно ухудшаются вплоть до полной невозможности продолжения наблюдений. В зависимости от среднего движения малой планеты и эксцентриситета орбиты ее оппозиции следуют одна за другой в среднем с интервалами 14–17 месяцев. В настоящее время в силу широкого использования экваториальных координат для малых планет термин «оппозиция» понимается в смысле «оппозиция по прямому восхождению», но сказанного выше это практически не затрагивает.

Для того чтобы иметь возможность наблюдать малую планету в последующих после ее открытия оппозициях, необходимо заранее предвычислить ее положения на небе для ряда моментов времени, т. е. вычислить ее эфемериду. Эфемериды вычисляются на основе элементов орбиты, найденных по имеющимся наблюдениям. Знание элементов орбиты никогда не бывает абсолютно точным, поскольку элементы определяются по наблюдениям, обремененным случайными и систематическими ошибками. Ошибки элементов орбит возникают также из-за недостаточного учета возмущений, оказывающих влияние на движение малой планеты.

В результате эфемериды не вполне точно предсказывает реальные положения тела, которое в силу этого может быть не найдено или неправильно отождествлено. Но даже если тело будет найдено, орбита его может нуждаться в исправлении с учетом

разностей между наблюдаемыми и предвычисленными положениями. Слежение за большим числом открытых малых планет, а их число к началу XX в. приблизилось к 500, являлось, таким образом, весьма трудоемкой задачей, требующей определенной международной организации и разделения труда. Возникла необходимость создать международную службу малых планет, в задачи которой входили бы сбор и публикация наблюдений малых планет, присвоение вновь открываемым телам предварительных обозначений, а затем постоянных номеров и названий, если их орбиты определены достаточно надежно, регулярное исправление элементов орбит на основе новых наблюдений, вычисление эфемерид малых планет на предстоящие оппозиции и их публикация. Во втором десятилетии XX в. такая служба была создана на базе Вычислительного института в Берлине, который и ранее активно работал в этой области. Начиная с 1915 г. Вычислительный институт стал издавать ежегодник «Kleine Planeten», в котором публиковались эфемериды всех занумерованных малых планет, имеющих оппозицию в очередном году, а также элементы орбит занумерованных планет и их названия. Работа по уточнению орбит и вычислению эфемерид была организована на кооперативных началах. В этой работе активное участие принимал созданный в 1919 г. в Петрограде Вычислительный институт, который позже был преобразован в Астрономический институт.

## **Конец ознакомительного фрагмента.**

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.