

ПОПУЛЯРНЫЕ ЛЕКЦИИ
ПО АСТРОНОМИИ



Е. А. Требеников, Ю. А. Рябов

ЧТО ТАКОЕ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА



Е. А. ГРЕБЕНИКОВ, Ю. А. РЯБОВ

ЧТО ТАКОЕ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1966

531

Г 79

УДК 521.10

Гребеников Евгений Александрович

Рябов Юрий Александрович

Что такое небесная механика

(Серия: «Популярные лекции по астрономии»)

М., 1966 г., 112 стр. с илл.

Редактор Г. С. Куликов

Техн. редактор Л. А. Пыжова

Корректор Л. Н. Боровина

Сдано в набор 20/VI 1966 г. Подписано к печати 26/IX 1966 г. Бумага 84×108¹/₃₂. Физ. печ. л. 3,5. Условн. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,29.
Тираж 25 000 экз. Т-12741. Цена 21 коп. Заказ № 1625.

Издательство «Наука»

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

Набрано в первой Образцовой типографии имени А. А. Ждацкого
Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Москва, Ж-54, Воровая, 28.

Отпечатано во 2-й типографии изд-ва «Наука». Москва, Шубинский пер., 10
2-6-2
233-66

1. ВВЕДЕНИЕ

Если до недавнего времени слова «небесная механика» употреблялись лишь учеными-астрономами, то в наши дни это название одной из наук о небе, а также такие понятия, как «астродинамика», «космические полеты», «исследование космоса», широко известны. Это объясняется огромными успехами, достигнутыми в деле непосредственного покорения космического пространства как в нашей стране, так и за рубежом. За последние два года в среднем каждую неделю производились один-два запуска космических объектов, будь то искусственный спутник, космический корабль или автоматическая межпланетная станция. Сегодня нам уже известно, как выглядит обратная сторона Луны, известны свойства околоземного пространства, многие тайны Венеры, получены новые интересные данные о поверхности Марса, а ведь 15—20 лет назад не только большинство людей, но и многие ученые-астрономы не представляли себе, что исследования космического пространства будут развиваться такими поистине фантастическими темпами.

На вопрос, какие науки участвуют своими результатами или методами в покорении космоса, любой специалист ответит: все без исключения естественные науки. Это действительно так. Астрономия, математика, механика, физика, химия, биология, медицина, технические науки участвуют в исследовании космического пространства, но мы не ставим задачу рассказать о том вкладе, который вносит каждая из перечисленных наук в проблему непосредственного изучения космоса. Это очень большая тема, освещение которой потребовало бы сотрудничества многих специалистов по разным разделам естествознания.

Мы хотим рассказать читателю о небесной механике, играющей в деле покорения космического пространства одну из главных ролей, рассказать о ее содержании, методах и результатах.

Итак, что такое небесная механика?

Механика — это наука, которая изучает механическое движение (движение в пространстве) отдельных тел или сред, поэтому нетрудно догадаться, что небесная механика изучает, очевидно, движение н е б е с н ы х тел. Если до 4 октября 1957 г. это были естественные небесные тела — планеты, кометы, звезды, — то теперь небесная механика расширила область своего применения и занимается изучением движения также искусственных небесных тел — космических ракет, искусственных спутников Земли, автоматических межпланетных станций.

Небесная механика представляет собой раздел одной из самых древних и увлекательных наук — астрономии. Именно раздел астрономии, так как астрономия — это наука, которая изучает возникновение, развитие, строение и движение небесных тел.

Небесная механика, как и всякая другая наука, имеет свои законы, принципы и методы исследования, поэтому вполне уместен вопрос: какие законы, какие принципы положены в основу небесной механики? Основой небесной механики является закон всемирного тяготения и так называемые «принципы механики». В этом смысле можно сказать, что небесная механика представляет собой часть механики. Если же говорить о методах исследования, применяемых в небесной механике, то можно сказать, что они являются математическими методами. Это объясняется тем, что движение любого небесного тела описывается некоторыми весьма сложными уравнениями, а решение уравнений невозможно без применения математического аппарата.

Поэтому, если бы мы пожелали дать более подробное определение небесной механики, то можно было бы сказать:

Небесная механика — это наука, которая, опираясь на основные законы механики и пользуясь математическими методами, изучает движение всевозможных небесных тел.

Основателей современной небесной механики Иоганна Кеплера (1571—1630), Галилео Галилея (1564—1642), Исаака Ньютона (1643—1727), Пьера Лапласа (1749—

1827), Жана Лагранжа (1736—1813) и других невозможно считать учеными, работавшими только в одной области науки. Эти гениальные ученые сделали великие открытия и в астрономии, и в математике, и в механике.

Было бы, конечно, неправильно думать, что на протяжении веков небесная механика пользовалась одними и теми же методами и исследовала одни и те же объекты. Содержание и методы любой науки, в том числе и небесной механики, непрерывно изменяются и развиваются.

Поэтому представляет интерес (хотя бы кратко) познакомиться с основными этапами возникновения и развития небесной механики на протяжении веков.

Если следить ночью за звездами, то кажется, что все они прикреплены к небесному своду, который вращается вокруг Земли. Древние астрономы считали, что так и происходит на самом деле, что звезды прикреплены к физически реальной небесной сфере, вращающейся вокруг Земли. Однако, кроме звезд, уже в древности были известны пять светил, которые хотя и участвовали в суточном вращении вместе с небосводом, но не сохраняли относительно звезд одно и то же положение, а перемещались между ними весьма странным образом. Древние греки называли эти светила *планетами* (по-гречески «планета» означает «блуждающая звезда»), а древние римляне присвоили им такие собственные названия: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн. Эти пять планет сыграли решающую роль в астрономии и прежде всего в небесной механике.

Перемещения планет при их более или менее тщательном изучении поражают своей сложностью, и древнегреческие астрономы впервые поставили вопрос о том, не являются ли эти перемещения лишь отражением более правильных регулярных движений планет в пространстве. Это был большой шаг вперед. Собственно говоря, с этого времени начинается период построения *геометрической картины движения планет в пространстве на основании наблюдений*. Конечно, первые представления о движениях планет, об их орбитах (орбитами планет астрономы называют траектории — пути планет в пространстве) были весьма далекими от истины, и это объясняется тем, что древние ученые исходили из ложных положений. Древнегреческие ученые считали, во-первых, что Земля неподвижна, а все остальные светила (звезды, Луна,

Солнце и планеты) действительно обращаются вокруг Земли. Во-вторых, они считали, что в небесах царит идеальный порядок и там могут иметь место только идеальные, равномерные движения по окружностям.

Наиболее полной теорией движения планет в пространстве, опирающейся на эти представления, была теория древнегреческого астронома Клавдия Птолемея (II в. нашей эры). Согласно этой теории движение планет складывалось из комбинаций равномерных круговых движений. Подбор радиусов кругов и скоростей Птолемей выполнил с большим мастерством, и его схема действительно отражала основные особенности видимых перемещений планет на небе (например, прямые и попятные движения планет). Не умаляя заслуг Птолемея, который был весьма требовательным к научным выводам ученым, мы не можем не сказать, что его схема мира была в принципе порочной. Земля согласно его схеме — центр мира и Вселенной, в которых существует идеальный порядок. Такая постановка вопроса оказалась весьма полезной для религии и официальных властей, ибо она исходила из того, что существует бог. Это в свою очередь снимало с повестки дня науки вопрос о выяснении действительных законов, управляющих движением небесных тел.

Но было бы несправедливо думать, что в эпоху, относящуюся, так сказать, к предыстории небесной механики, все данные о движениях небесных тел были неправильными. Предсказание лунных и солнечных затмений, измерение времени на основании изучения видимого движения небесных тел (особенно Луны и Солнца) делались древними астрономами с большой точностью.

После Птолемея в течение четырнадцати столетий не появилось, по существу, ничего нового в представлениях о движениях планет, Солнца, Земли.

Революционную перестройку всей астрономии произвел гениальный польский ученый Николай Коперник (1473—1543). В 1543 г. было опубликовано сочинение Коперника «Об обращении небесных сфер» (сам автор получил первый экземпляр собственной книги в день своей смерти), в котором он отбросил положение о неподвижности Земли, веками владевшее умами людей и поддерживаемое властями и религией.

Согласно его теории Земля вместе со всеми планетами движется в пространстве вокруг Солнца, а кроме этого,

обладает вращательным движением вокруг своей оси. Он показал, что именно исходя из этого можно объяснить главные особенности видимых перемещений небесных светил, в частности планет. Коперник впервые в астрономии определил приблизительно относительные расстояния планет от Солнца (по сравнению с расстоянием Земли от Солнца), периоды обращения планет вокруг Солнца, т. е. создал правильную в целом картину движения Земли и планет.

Конечно, в настоящее время едва ли необходимо кого-либо убеждать, что теория Коперника была гениальным открытием, поставившим Солнце, планеты и Землю на их истинные места в солнечной системе и проложившим путь для дальнейшего расцвета астрономии. Но в ту эпоху, когда Европу еще плотно окутывал религиозный туман средневековья, вера в неподвижность Земли, в движение Солнца вокруг Земли, хорошо согласующаяся с нашими обыденными ощущениями, была слишком велика. Сейчас нам даже трудно представить, насколько абсурдной, еретической и опасной казалась тогда теория Коперника; она рассматривалась вначале почти всеми как фантастическая бессмыслица, как вызов библии и здравому смыслу.

Огромную роль в победе новых идей сыграли замечательные ученые Галилео Галилей и Иоганн Кеплер.

Работы Галилея были посвящены в основном защите самого принципа движения Земли и планет вокруг Солнца. Галилей, первым в истории направивший на небо зрительную трубу, обнаружил четыре спутника Юпитера. Эти спутники как бы воспроизводили в миниатюре планетную систему. Их открытием была доказана ошибочность старой догмы о том, что центром движений может быть только Земля. Наглядно было опровергнуто возражение против системы Коперника, состоящее в том, что Луна не может обращаться вокруг движущейся Земли, не отставая от нее. Но ведь обращаются же вновь открытые спутники вокруг движущегося Юпитера!

Галилей обнаружил также, что Венера не всегда видна в виде полного диска, что она, как Луна, имеет вид то серпа, то половины круга, то совсем не видна. Этим доказывалось, что Венера, как и Луна, есть темное тело, отражающее свет от Солнца, и что Венера обращается вокруг Солнца.

Направив телескоп на Луну, Галилей обнаружил, что Луна совсем не идеально гладкий шар, как думали раньше обо всех небесных телах; на Луне были видны горы и впадины, она была в какой-то мере похожа на Землю. Это подтверждало, что Земля — обычное небесное тело, не отличающееся в целом от других небесных тел.

Кеплер же занимался прежде всего тщательным изучением движений планет и Земли. Ему удалось обнаружить замечательные особенности движений планет. Описания этих особенностей известны сейчас под названием трех законов Кеплера. Согласно этим законам каждая планета движется по эллипсу, причем Солнце находится в одном из фокусов этого эллипса; скорость движения планеты по своей орбите в каждый момент времени изменяется примерно обратно пропорционально расстоянию планеты до Солнца; квадраты периодов обращения каких-либо двух планет относятся между собой, как кубы больших полуосей их эллиптических орбит.

Открытием этих законов завершился целый период описательного или геометрического изучения свойств планетных движений, начатого еще древнегреческими астрономами. Роль их в развитии небесной механики и всей астрономии в целом огромна, так как именно они составили базу дальнейших исследований. Было выяснено, наконец, как движутся в пространстве планеты (с той точностью, с какой позволяли наблюдения того времени).

Но после этого возник новый вопрос: почему же именно так — в согласии с законами Кеплера — движутся планеты? Естественно, что если бы представления об истинных движениях планет были неверными, то исследования пошли бы по неверному пути.

До тех пор, пока Земля считалась чем-то особенным и единственным в мире, а небесные явления — не имеющими какого-либо отношения к Земле и происходящими по каким-то «небесным законам», такой вопрос и не возникал. Так было в далекие древние времена, за много веков до нашей эры, так было и в мрачные века средневековья, когда полностью господствовала вера в неподвижность Земли, в ее центральное положение в мире и т. д. Однако после открытий Коперника, Кеплера, Галилея этим ложным представлениям был нанесен сокрушительный удар. Стало ясно, что Земля — рядовая планета, движущаяся

вместе с другими планетами вокруг Солнца, что Земля есть небесное тело, похожее на другие планеты, на Луну. Появилась мысль о том, что и все другие небесные тела должны обладать такими же свойствами, что и Земля, в частности свойством притягивать предметы.

Что заставляет тела падать на Землю? Древнегреческие ученые объясняли этот простой факт тем, что все тяжелые тела должны стремиться «вниз», к центру мира, каким они считали центр Земли. Это свойство они называли тяжестью.

Если это свойство присуще не только Земле, но и небесным телам, то это значит, что материальные тела, находящиеся вблизи Луны, планет, Солнца, должны также стремиться к их центрам. Другими словами, они должны притягиваться этими небесными телами. Таким образом, распространение свойства тяжести на небесные тела ставит вопрос о взаимодействии этих тел.

Вместе с тем особенности солнечной системы указывали на то, что Солнце, находясь в центре системы планет, играет важную роль в их движении. Солнце находится в фокусе всех эллиптических орбит планет; приближаясь к Солнцу, планеты начинают двигаться быстрее по своим орбитам, удаляясь же от Солнца, они замедляют свое движение; периоды обращения всех планет и их расстояния от Солнца связаны единой закономерностью. Сам Кеплер считал, что движение планет управляется Солнцем, что оно удерживает планеты около себя и что вообще любые два тела в небесном пространстве стремятся друг к другу, как два магнита. Однако Кеплер понимал роль притяжения в движении планет неправильно; он считал, что Солнце притягивает планеты, как магнит, и, вращаясь, увлекает их за собой.

Такая точка зрения на связь между притяжением и движениями планет объяснялась тем, что само представление о законах движения материальных тел на Земле было неверным. В обычной земной механике сохранялись положения, выдвинутые еще древнегреческим ученым Аристотелем (VI—V вв. до н. э.), согласно которым тела могут двигаться лишь тогда, когда на них действует сила, и что при отсутствии сил тела должны покоиться. Эти положения, казалось, настолько соответствовали фактам повседневной жизни, что они не подвергались сомнению двадцать веков. Основы механики, законами которой мы

пользуемся до настоящего времени, были заложены только Галилеем, обнаружившим несостоятельность механики Аристотеля.

Галилей провел ряд опытов с гладко отполированным металлическим шариком, катящимся по гладкой наклонной доске. Если шарик толкнуть по доске вверх, то его движение замедляется, он, в конце концов, останавливается, а затем катится с ускорением вниз. Далее Галилей обнаружил, что если придавать доске меньший уклон, то шарик испытывает меньшее замедление при движении вверх и меньшее ускорение при скатывании. Отсюда следует, что если доска будет расположена строго горизонтально, то шарик не должен испытывать ни замедления, ни ускорения, т. е. должен катиться равномерно как угодно долго. Галилей писал:

«Когда тело движется по горизонтальной плоскости, не встречая никакого сопротивления, то движение его является равномерным и продолжалось бы бесконечно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца». Конечно, практически это неосуществимо. Шарик все равно остановится из-за трения о доску. Именно действие трения вводило в заблуждение всех ученых древности, изучавших зависимость движения тел от сил, на них действующих. Только Галилею удалось впервые понять роль трения и сформулировать результат: тела движутся ускоренно или замедленно лишь вследствие действия различных сил; если же на тело не действуют силы, то оно будет двигаться с неизменной скоростью (равномерно) и по прямой линии. Это свойство тел двигаться при отсутствии сил равномерно и прямолинейно получило название *инерции*.

Перенесение этого свойства движений материальных тел в земных условиях на движения небесных тел в пространстве позволяло по-новому взглянуть на причины движения планет. Понски «подталкивающих» сил были излишними: ведь планеты могли двигаться и без них — по инерции. Учет же сил, действующих на планеты, должен был объяснить не факт их движения, а только его характер и закономерности.

Путь к созданию небесной механики, возникшей в результате применения законов механики земных тел к небесным телам, был открыт. Но решающее слово было сказано великим английским ученым И. Ньютоном, ко-

торому и принадлежит честь создания небесной механики как науки.

В 1687 г. вышла его знаменитая книга «Математические начала натуральной философии» — одно из самых фундаментальных научных творений всех времен. Эта книга охватывает три области: механику, математику, движение небесных тел, и в каждой из этих областей были получены результаты, послужившие базой для всех дальнейших исследований в этих областях до наших дней.

В области механики Ньютон сформулировал свои три закона, на которых целиком покоится до сих пор так называемая классическая механика материальных тел.

Первый закон (закон инерции) говорит, что всякое тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения до тех пор, пока оно не будет выведено из этого состояния приложенными к нему силами.

Второй закон устанавливает связь между ускорением тела и приложенной к нему силой: ускорение, приобретаемое телом, пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе. Само понятие массы как количества вещества было введено именно в этом законе.

Третий закон Ньютона говорит о том, что если одно тело действует на другое с какой-то силой в данном направлении, то это другое тело действует на первое с такой же силой, но направленной строго в противоположную сторону.

Это — чисто «земные» законы, но важно то, что именно применение этих земных законов к небесным телам позволило Ньютону открыть закон тяготения.

Теоретические исследования Ньютона показали, что эллиптическое движение планеты вокруг Солнца по законам Кеплера происходит в том случае, если на планету действует сила, направленная всегда к Солнцу и обратно пропорциональная по величине квадрату расстояния планеты от Солнца. Надо сказать, что этот результат Ньютону удалось получить с помощью методов, которые послужили началом развития высшей математики (дифференциального и интегрального исчисления). Можно сказать, что высшая математика родилась одновременно с небесной механикой и что еще очень долго после Ньютона, почти до конца XIX в., высшая математика развивалась бок о бок с небесной механикой.

Ньютон подверг анализу движение не только планет, но и их спутников. В те времена уже были известны четыре спутника Юпитера, открытые еще Галилеем, и пять спутников Сатурна, открытые Гюйгенсом и Ж. Кассини. Наблюдения этих спутников показывали, что они движутся в соответствии с законами Кеплера. С помощью математических вычислений Ньютон пришел к выводу, что такие движения могут происходить тогда, когда спутники притягиваются к центру своей планеты с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния до центра планеты.

Ньютон далее доказал, что сила, управляющая движением Луны, есть не что иное, как сила тяжести на Земле, которая действует во всех направлениях, убывая пропорционально квадрату расстояния от Земли.

Еще Галилей проводил опыты, из которых следовало, что тяжелые тела падают на Землю равномерно ускоренно с одним и тем же ускорением около $9,8 \text{ м/сек}^2$. Согласно второму закону Ньютона на все тела действует сила, направленная вертикально вниз (к центру Земли), т. е. эти тела притягиваются к центру Земли. Этой силой определяется тяжесть (вес) тел. Тела обладают тяжестью и совсем близко у поверхности Земли и на уровне высоких горных вершин. Но что может помешать этой силе притяжения к центру Земли действовать и на большем расстоянии?

По данным того времени Луна двигалась вокруг Земли примерно по кругу радиусом 384 тыс. км с периодом около $27\frac{1}{3}$ суток. На поверхности Земли, т. е. на расстоянии около 6370 км от ее центра, ускорение силы тяжести равно примерно $9,8 \text{ м/сек}^2$. На расстоянии же 384 тыс. км от Земли эта сила, если она изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, должна создать ускорение, меньшее в $\left(\frac{384\,000}{6370}\right)^2 \approx 3640$ раз, т. е. $0,270 \text{ см/сек}^2$. Таким должно было бы быть ускорение Луны, если оно вызывается притяжением Земли. Но именно такое ускорение и имеет Луна при своем движении по кругу с указанным выше радиусом. Действительно, материальное тело обладает при равномерно круговом движении центростремительным ускорением, равным $\frac{v^2}{r}$, где v — скорость движения и r — расстояние до центра. Для Луны вычисления дают $v = 1,02 \text{ км/сек}$, $\frac{v^2}{r} = 0,271 \text{ см/сек}^2$.

Совпадение двух чисел (0,270 и 0,271) очень хорошее, если к тому же учесть, что фактически Луна движется не точно по кругу, а по эллипсу и неравномерно.

На основании всего этого Ньютон сделал вывод, что обращение всех планет вокруг Солнца и спутников вокруг своих планет, в частности Луны вокруг Земли, есть явление одной и той же природы. Все спутники и планеты движутся под действием силы, направленной к центру того небесного тела, вокруг которого происходит движение, и обратно пропорциональной квадрату расстояния до этого центра. Другими словами, Солнце, Юпитер, Сатурн, Земля обладают свойством притягивать другие тела. На Земле это притяжение распространяется на все материальные тела и определяет известное свойство тяжести.

Но всякое притяжение, как это следует из третьего закона механики, есть взаимное свойство. Поэтому если Солнце притягивает все планеты, то и каждая планета должна притягивать к себе Солнце. Если Земля притягивает Луну, то и Луна должна притягивать Землю. Наконец, если Земля притягивает все материальные тела, то все эти тела должны притягивать к себе Землю. Это приводит к мысли о том, что свойство притягивать присуще не только каждому небесному телу, но и вообще всем материальным телам, всем частицам, из которых состоят эти тела. Ньютон приходит к утверждению об универсальности явления притяжения между любыми материальными, в частности небесными, телами. В отличие от умозрительных высказываний предшественников Ньютона это утверждение опирается на строгий анализ фактических движений небесных тел.

Для того чтобы окончательно сформулировать закон притяжения, надо было бы еще точно указать, что влияет на величину силы притяжения. Выше мы уже говорили, что эта сила по исследованиям Ньютона изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Ньютон показал также, что сила притяжения точно пропорциональна массе тела.

Действительно, ускорение w силы тяжести F для любых тел на Земле одинаково ($9,8 \text{ м/сек}^2$). Но по второму закону механики $mw = F$. Из постоянства w следует, что сила F пропорциональна m .

На основании всего этого Ньютон и формулирует свой знаменитый закон, получивший название закона всемир-

ного тяготения: «Каждая материальная частица притягивает другую материальную частицу с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними».

Этот закон вместе с законами механики составил фундамент новой науки — небесной механики. Отныне стало возможно не только описывать наблюдаемые движения тел, но также изучать эти движения теоретически, вычислять их с помощью математических методов.

Изучение движений различных небесных тел с помощью закона всемирного тяготения превратилось в строгую математическую задачу, и дальнейшие успехи небесной механики неразрывно связаны с развитием высшей математики, с развитием методов решения и анализа так называемых дифференциальных уравнений.

В XVIII в. небесная механика развивалась под непосредственным влиянием работ Ньютона, а в конце этого столетия благодаря работам выдающихся математиков Клеро (1713—1765), Даламбера (1717—1783), Эйлера (1707—1783), Лагранжа (1736—1813) и Лапласа (1749—1827) в небесной механике начали создаваться методы, которые позже применялись для построения теорий движения конкретных небесных тел. В этом же столетии возникла большая потребность в точных таблицах движения Луны, необходимых для определения местоположения кораблей на море, и именно этим объясняется, что в середине XVIII в. появилось относительно много теорий движения Луны, а на их основе было составлено много таблиц с координатами Луны.

XIX век в небесной механике можно считать «веком построения аналитических теорий движения» небесных тел и прежде всего больших планет. Именно в XIX в. были составлены таблицы движения больших планет, на основании которых мы вычисляем координаты этих тел и в настоящее время. Эта гигантская работа была выполнена большой группой астрономов различных стран, среди которых выдающееся место занимают трое знаменитых астрономов и математиков: Леверье (1811—1877), Ньюкомб (1835—1909), Хилл (1838—1914).

Среди всех открытий в небесной механике особое значение имеет открытие восьмой планеты солнечной системы — Нептуна. Этот вопрос рассмотрен специально в разделе 5, поэтому здесь мы хотим написать лишь несколько слов.

Было бы неправильно думать, что все успехи небесной механики после Коперника объясняются лишь выдающимся вкладом, который внесла в науку плеяда гениальных ученых-теоретиков. Наряду с теоретическими исследованиями все время развивалась и наблюдательная астрономия, улучшались ее методы, совершенствовались астрономические инструменты. В течение XVII и XVIII вв. были открыты почти все спутники Юпитера и Сатурна, были определены их периоды обращения и их расстояния от планет. Наконец, в 1781 г. знаменитый английский астроном Вильям Гершель (1738—1822), систематически наблюдая небо на весьма совершенных инструментах, созданных, кстати, им самим на собственные средства, открыл новую неизвестную планету, впоследствии названную Ураном. Открытие Урана можно считать большим успехом наблюдательной астрономии. Дальнейшие систематические наблюдения Урана и попытки построения его теории движения, согласующейся с наблюдениями, привели к выводу, что существует не наблюдавшаяся до тех пор планета, которая вызывает некоторые отклонения в движении Урана.

В 1846 г. французский астроном У. Леверье и английский астроном Дж. Адамс теоретически, с помощью формул небесной механики, предсказали, каким образом эта планета должна двигаться в пространстве и где ее искать на небе. Действительно, планета была обнаружена именно там, где она должна была быть согласно вычислениям. Новая планета получила название Нептун. Его открытие подтвердило правильность основ небесной механики.

XIX век знаменит еще одним выдающимся результатом астрономии. В 40-х годах впервые было измерено расстояние до ближайших к нам звезд, и, начиная с этого времени, многие ученые-астрономы стали исследовать движения звезд с точки зрения механики. Науке, занимающейся изучением звезд и звездных систем, *звездной динамике* присущи свои специфические методы исследования, но в ее основу положены законы небесной механики. В этом смысле не будет ошибочным утверждение, что звездная динамика есть не что иное, как звездная небесная механика.

В первой половине XX в. продолжали развиваться методы построения теорий движения планет, спутников,

комет, однако наиболее характерным для этого периода является развитие *качественной небесной механики*, чему мы прежде всего обязаны двум гениальным ученым: А. Пуанкаре (1854—1912) и А. М. Ляпунову (1857—1918). Они создали совершенно новые методы исследований, которые дают возможность изучать движение небесных тел для больших (порядка сотен миллионов лет) промежутков времени и предсказать основные особенности развития солнечной системы на многие миллионы лет. Эти методы позволяют не столько вычислять точные орбиты конкретных небесных тел, сколько изучать общие свойства их движений.

В наши дни небесная механика становится более увлекательной и интересной наукой. Мы объясняем это тем большим импульсом, который она получила в результате осуществления научно-технической революции в современном мире.

4 октября 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли, 12 апреля 1961 г. советский летчик-космонавт Ю. А. Гагарин впервые в истории человечества совершил облет Земли на космическом корабле.

Начиная с этого времени можно утверждать, что у небесной механики появилось новое свойство, которого у нее не было в прошедшие эпохи. Небесная механика теперь не только *изучает* движения всевозможных небесных тел, но и *управляет* движением всевозможных искусственных небесных тел, а в будущем, возможно, будет управлять движением и некоторых естественных небесных тел. Естественно, изучение движения запущенных искусственных небесных тел остается одной из основных задач современной небесной механики. Задача управления движением космических кораблей и автоматических межпланетных станций рассматривается нами здесь лишь как задача коррекции (исправления) траекторий, т. е. мы не будем касаться непосредственных методов коррекции (технической стороны дела). Эта задача столь важна для межпланетных полетов, что без ее решения реальные межпланетные полеты с непосредственным участием людей немислимы. Действительно, любой эксперимент, как бы тщательно он ни был продуман и проведен, обязательно сопровождается ошибками, отклонениями и всесторонняя подготовка опыта сводит лишь к минимуму ошибки, но полностью их не исключает. В космических полетах, для которых

характерны огромные расстояния, ошибки, допущенные в начале старта, какими бы малыми они ни были, в конечном счете порождают такие отклонения в положении запущенного тела, что перелеты в пределах солнечной системы без коррекции, по существу, невозможны.

В настоящее время стала весьма актуальной еще одна задача небесной механики. Это так называемая задача «больших возмущений», сущность которой заключается в следующем. Естественные небесные тела (большие планеты, многие спутники, малые планеты, кометы) движутся на очень больших расстояниях друг от друга, поэтому силы взаимного притяжения намного меньше силы притяжения со стороны Солнца. Космическому кораблю, совершающему межпланетный перелет, придется некоторое время двигаться на небольшом расстоянии от планет, а это значит, что он будет притягиваться «большими» силами. Такие задачи, в которых учитывается несколько «больших» сил притяжения, имеют очень сложное решение. Ради справедливости следует сказать, что и раньше в небесной механике рассматривалась задача с большими возмущениями при исследовании движения комет, проходящих вблизи Юпитера, и даже при исследовании движения Марса, на который большое влияние оказывает Юпитер. Именно наличие больших возмущений мешало до последнего времени астрономам создать точную теорию движения Марса (более подробно об этом написано в разделе 5).

Современная практика поставила перед небесной механикой еще одну проблему. Мы имеем в виду проблему «б ы с т р о г о» получения результатов. Если раньше специалисты работали над построением теорий движения многие годы, так как вопрос об ограничении времени, необходимым для решения, даже не возникал, то в наши дни этот вопрос является одним из главных. Действительно, чтобы произвести коррекцию орбиты космического тела, необходимо непрерывно вести вычисления элементов орбиты, потому что только в таком случае можно вовремя «исправить» траекторию полета. К счастью, современная вычислительная техника позволяет за несколько минут выполнить такой объем вычислений, для которого 100 лет назад требовались бы целые годы.

Из сказанного становится ясно, что в последние годы круг задач небесной механики сильно расширился, а это

в свою очередь привело к развитию новых методов исследования. У небесной механики появились общие задачи с науками, стоявшими от нее раньше относительно далеко (теория управления, биология, медицина, радиоэлектроника и др.).

Появление нового направления в небесной механике неизбежно ставит перед ее «традиционными» разделами, которые развиваются со времен Ньютона, новые задачи. В процессе развития науки очень часто бывает, что появление нового направления неизбежно выдвигает новые требования к предыдущим, уже развитым направлениям, а иногда даже ставит вопрос о фундаментальном пересмотре старых направлений. Например, для нужд космонавтики необходима новая, более точная теория движения больших планет, необходимо уточнить размеры солнечной системы, т. е. продолжать развитие тех разделов небесной механики, которые были созданы в XVIII—XIX вв.

Бурное развитие небесной механики привело к тому, что у специалистов — небесных механиков появились различные точки зрения на методы и проблематику небесной механики, но это, несомненно, лишь будет способствовать дальнейшему ее развитию.

Цель настоящей книги — познакомить широкий круг читателей с основными законами небесной механики, ее методами и, конечно, основными результатами этой замечательной науки, накопленными за много веков. В некоторых разделах книги мы приводим математические формулы, выражающие основные законы небесной механики, уравнения и их решения без вывода и доказательства. Это объясняется тем, что изложение математических вопросов небесной механики для нас не является самоцелью, а лишь должно способствовать, по нашему мнению, более полному и глубокому пониманию ее основных идей и результатов. Так как исследование движения искусственных небесных тел в наше время вызывает у читателей особый интерес, то этому вопросу мы уделяем специальное внимание в разделе 6.

На любом этапе развития в любой науке всегда существуют нерешенные задачи, и в этом смысле небесная механика не является исключением. В небесной механике имеется много интересных, но пока нерешенных задач, о которых мы также расскажем в этой книге.

2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ, УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

В основе небесной механики лежит положение о том, что все небесные тела в космическом пространстве являются материальными телами, подчиняющимися, с одной стороны, трем законам «земной» механики и, с другой стороны, закону всемирного тяготения. Эти законы и являются основными в небесной механике.

Из законов механики наиболее существенным и непосредственно применяемым является второй: ускорение, приобретаемое телом под действием некоторой силы, прямо пропорционально этой силе и обратно пропорционально массе тела или же произведение массы тела на его ускорение равно действующей силе.

Если обозначить через F силу, через w ускорение тела и через m его массу, то математически второй закон механики записывается в виде

$$w = \frac{F}{m} \quad \text{или} \quad mw = F.$$

При этом ускорение направлено точно в ту же сторону, что и сила.

Закон всемирного тяготения позволяет установить, какие силы действуют на небесные тела, притягивающие друг друга. Математически этот закон выражается следующим образом.

Пусть имеются две материальные частицы (или, точнее говоря, материальные точки *) с массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии r друг от друга. Тогда сила их взаимного тяготения F равна

$$F = f \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где f — некоторое число, одинаковое для всех материальных частиц. Это число называют *постоянной тяготения*. В системе единиц СГС $f = 6,670 \cdot 10^{-8}$.

Подчеркнем, что этот закон сформулирован для материальных частиц (точек). Если же мы рассматриваем произвольные тела A и B , находящиеся на сравнительно

*) В механике материальными точками называются тела, размеры которых очень малы по сравнению с рассматриваемыми расстояниями.

небольшом расстоянии друг от друга, то определение силы притяжения между телами становится сложным. Само понятие расстояния между телами становится неопределенным. Можно говорить о расстоянии между ближайшими точками их поверхности, между их центрами тяжести и т. д.

Разобьем мысленно эти тела на небольшие частицы с массами m . Эти частицы притягивают друг друга по закону Ньютона, и общее притяжение тел A и B складывается из взаимных притяжений отдельных частиц. В небесной механике имеется специальный раздел — теория притяжения, — где рассматривается вопрос о притяжении тел различной формы и с различным распределением плотности.

Подавляющее большинство небесных тел, в том числе планеты, спутники планет, Солнце и др., рассматриваются как материальные точки. Это оказывается возможным, во-первых, по той причине, что небесные тела отделены друг от друга огромными расстояниями, несравненно большими, чем их размеры. Во-вторых, оказывается, что шарообразные тела, притягивают так же, как материальные точки, помещенные в их центре и сосредоточившие в себе всю массу тела. Этот результат был получен еще Ньютоном. Большинство небесных тел действительно близко по своей форме к шарам.

Но все же в небесной механике имеется ряд задач, в которых приходится учитывать форму взаимно притягивающих тел. В этом случае проблема изучения их движения становится прежде всего задачей механики и математики. Об этом мы скажем ниже.

Рассмотрим какое-нибудь небесное тело солнечной системы, например ту или иную планету. Прежде всего надо выбрать механическую схему движения: определить, какие силы действуют на планету и какие из них мы будем учитывать. Действительно, учесть абсолютно все силы практически невозможно и в этом нет необходимости. По закону всемирного тяготения эта планета притягивается всеми другими телами Вселенной, в том числе бесконечно далекими звездами и галактиками, мельчайшими частицами космической пыли и т. д., о влиянии которых на планету едва ли можно говорить. Надо выделить наиболее существенные силы.

Главной силой, действующей на планету, является сила притяжения Солнца. Остальные тела солнечной

системы, не говоря уже о других телах бесконечного космического океана, оказывают на планету несравненно меньшее действие. Предположим, что мы ограничиваемся сначала этой главной силой. Тогда мы получим задачу о движении двух тел: Солнца и планеты.

Как мы упоминали выше, можно отождествить планету и Солнце с материальными точками. В такой механической схеме, если масса планеты равна m , а масса Солнца M , в каждый момент они притягивают друг друга с силой

$$F = f \frac{Mm}{r^2},$$

где r — расстояние между ними в этот момент. При анализе их движений нас интересуют, правда, не сами силы, а ускорения, создаваемые этими силами. Ускорение планеты от притяжения Солнца равно по второму закону механики $W = f \frac{M}{r^2}$, а ускорение Солнца от притяжения

к планете равно $w = f \frac{m}{r^2}$. Так как масса Солнца очень велика по сравнению с массой планеты, то w очень мало по сравнению с W , т. е. планета почти не оказывает на Солнце влияние, и его можно считать неподвижным.

Таким образом, мы пришли к задаче о движении тела P вокруг неподвижного тела S , притягивающего тело P с силой F , создающей ускорение W .

Чтобы исследовать это движение, надо сначала выбрать способ, позволяющий характеризовать положение P в пространстве относительно Солнца. Для этого пользуются системами координат. Они бывают разными; наиболее простая — так называемая прямоугольная система координат. Для ее построения проведем три взаимно перпендикулярные прямые, пересекающиеся в S (рис. 1). Эти прямые называются координатными осями и обозначаются обычно латинскими буквами; одна из них называется осью x , вторая — осью y , третья — осью z . Стрелки указывают направление осей, считающееся положительным. Проведем плоскости через эти оси; они называются координатными плоскостями и обозначаются так: (xy) , (yz) , (xz) . Расстояние от P до плоскости (xy) , т. е. длина перпендикуляра, опущенного из P на плоскость (xy) , называется координатой z ; расстояния P до двух других координатных плоскостей называются координатами x и y .

тами x и y соответственно. Каждому положению P в пространстве относительно Солнца отвечают свои три координаты x , y , z . Расстояние P от S выражается через x , y , z формулой $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

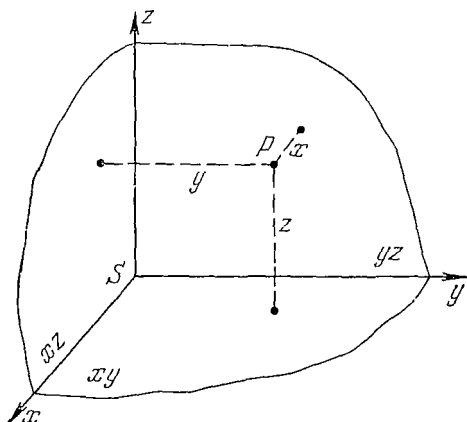


Рис. 1. Прямоугольная система координат.

Пусть тело P занимает в какой-то момент положение с некоторыми координатами x , y , z . Тогда его ускорение в этот момент равно

$$W = \frac{1}{m} F = \frac{fM}{r^2}.$$

Для того чтобы учесть направление ускорения W , рассматривают не само ускорение и не саму силу, а их проекции на оси координат. Проекции ускорения обозначим через W_x , W_y , W_z , а проекции силы через F_x , F_y , F_z соответственно. Проекция W на какую-либо ось, например, на ось z , определяется так. Из концов стрелки, обозначающей ускорение (длина стрелки пропорциональна величине W), опускаются перпендикуляры на оси (на рис. 2 — на ось z). Отрезок оси, заключенный между основаниями перпендикуляров, и есть проекция ускорения на эту ось. Так же определяются остальные проекции W и все

проекции силы F . Мы получим после вычислений, что

$$W_x = \frac{1}{m} F_x = -\frac{fM}{r^2} \frac{x}{r},$$

$$W_y = \frac{1}{m} F_y = -\frac{fM}{r^2} \frac{y}{r},$$

$$W_z = \frac{1}{m} F_z = -\frac{fM}{r^2} \frac{z}{r}.$$

Таким образом мы пришли к соотношениям между ускорением тела P и действующей силой, точнее, между проекциями ускорения и силы. Проекция же силы выражается в свою очередь через координаты тела P в пространстве. Такие соотношения для рассматриваемого небесного тела называются в небесной механике уравнениями движения этих тел. Они относятся к типу так называемых дифференциальных уравнений, изучаемых в высшей математике.

После того как уравнения составлены, задача о движении данного тела P как бы уходит из рук астрономов и механиков. Ставится чисто математическая задача: решить уравнения движения. В высшей математике доказывается, что эти уравнения целиком определяют, как будут изменяться координаты x , y , z , т. е. положение тела P с течением времени, если только известны положение и скорость P в какой-либо определенный момент времени (называемый начальным). Тот факт, что движение тела P зависит от начальной скорости, довольно очевиден. Например, пусть в начальный момент скорость направлена точно к Солнцу. Тогда тело P и в дальнейшем будет двигаться точно по направлению к Солнцу, т. е. «падать» на него. Пусть, далее, начальная скорость P направлена строго от Солнца. Тогда тело P будет двигаться точно по прямой, удаляясь от Солнца. Чем больше начальная скорость, тем дальше

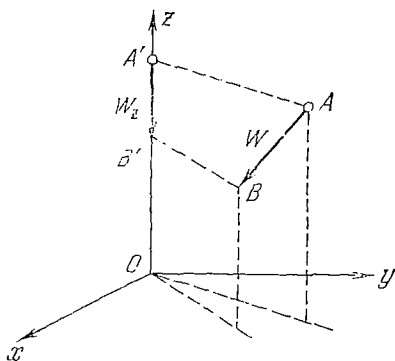


Рис. 2. Проекция вектора W' на ось z . AA' и BB' — перпендикуляры, опущенные на ось z .

может удалиться P от Солнца. При произвольно направленной начальной скорости тело P опишет в пространстве некоторую изогнутую траекторию.

Вопрос о непосредственном нахождении решений уравнений движения вообще чрезвычайно сложен. Собственно говоря, вся сложность небесной механики заключается главным образом в том, что мы не умеем найти решение любых уравнений движения. Точнее, мы не умеем найти решение в том виде, в каком его желательно получить, а именно найти точные формулы, выражающие зависимость между x , y , z и временем, т. е. дающие, как говорят математики, координаты x , y , z как функции времени.

Правда, написанные выше уравнения движения тела P под действием притяжения к S , т. е. уравнения задачи двух тел, были решены полностью еще Ньютоном. Мы остановимся на этой задаче несколько подробнее, так как она играет в небесной механике очень большую роль.

Пусть в начальный момент расстояние между S и P равно r_0 , а скорость P равна V_0 и направлена перпендикулярно к r_0 (рис. 3).

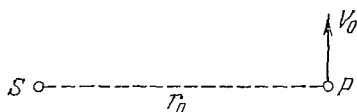


Рис. 3. Движение в задаче двух тел. Начальная скорость V_0 направлена перпендикулярно $SP=r_0$.

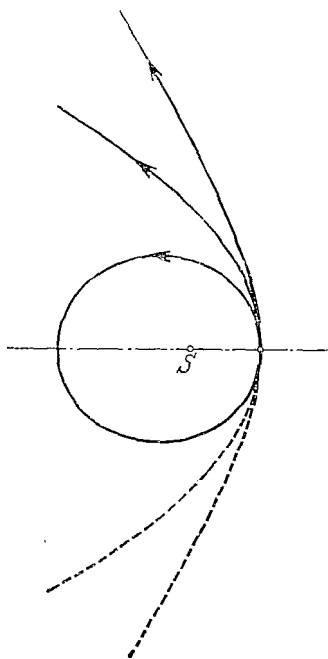


Рис. 4. Эллиптическая, параболическая и гиперболическая орбиты.

Рассмотрим движение в плоскости, в которой лежат скорость V_0 и S . Если V_0^2 не превышает величины $\frac{2[M]}{r_0}$, то орбита P будет эллипсом, в одном из фокусов которого на-

ходится S (рис. 4). В частности, если $V_0^2 = \frac{fM}{r_0}$, то орбита P есть окружность. Такая скорость называется круговой.

Если $V_0^2 = \frac{2fM}{r_0}$, то орбита представляет собой параболу, т. е. перестает быть замкнутой (рис. 4). Такая начальная скорость называется критической или параболической. Двигаясь по параболе, тело P уйдет от S бесконечно далеко и не возвратится.

При $V_0^2 > \frac{2fM}{r_0}$ тело P будет двигаться по незамкнутой кривой гиперболе (рис. 4) и также не возвратится к S . Чем больше V_0 , тем больше расстояние между ее ветвями и тем быстрее тело P будет удаляться от S .

Если скорость V_0 направлена под некоторым углом к r_0 , то общая картина движения не изменится. При скорости, меньшей критической, получим также эллиптическую орбиту, а при большей скорости — гиперболическую. Только расположение этих орбит будет другое.

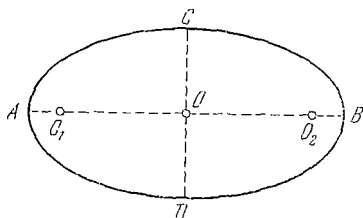


Рис. 5. Эллипс.

Ньютон показал, что движение по эллиптической орбите абсолютно точно соответствует первым двум законам Кеплера, поэтому они до сих пор сохраняют большое практическое значение.

В дальнейшем мы очень часто будем говорить о таких орбитах и прежде всего об орбитах эллиптических. Поэтому познакомимся здесь несколько более подробно с их свойствами.

Как известно, эллипсом называется кривая, для любой точки которой сумма расстояний от двух фиксированных точек O_1 и O_2 есть постоянная величина. Точки O_1 и O_2 называются фокусами эллипса (рис. 5).

При анализе движений по эллиптической орбите используют следующие геометрические понятия. Наибольший диаметр AB эллипса называется *большой осью*, а наименьший диаметр CD — *малой осью* эллипса. Точка O — центр эллипса, а отрезки $AO=OB$, $CO=OD$ называются *большой и малой полуосями* соответственно. Часто боль-

шую полуось эллиптической орбиты небесного тела называют средним расстоянием этого тела от Солнца. Отношение $\frac{OO_1}{OA}$ (в силу симметрии оно равно отношению $\frac{OO_2}{OB}$) называется *эксцентриситетом* эллипса. Чем больше эксцентриситет, тем больше смещены фокусы по отношению к центру, тем больше одна полуось эллипса отличается от другой и тем сильнее вытянут эллипс. Малая полуось CO связана с большой полуосью AO и эксцентриситетом e формулой

$$CO = AO \sqrt{1 - e^2}.$$

Окружность можно рассматривать как эллипс с эксцентриситетом, равным нулю. Если эксцентриситет мал, то малая и большая полуоси эллипса почти одинаковы и

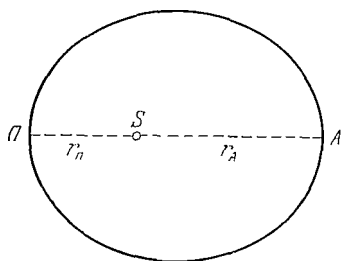


Рис. 6. Эллиптическая орбита. r_n и r_A — расстояния от S до перигея и апогея орбиты соответственно.

такой эллипс очень мало отличается от окружности. Например, если эксцентриситет равен 0,1, то получим $CO = 0,995 AO$. Если нарисовать такой эллипс, приняв большую полуось равной 5 см, то его будет трудно отличить от круга. Правда, смещение фокусов по отношению к центру эллипса составит тогда около 0,5 см, и оно будет достаточно заметным.

Наиболее удаленная точка эллиптической орбиты от фокуса S (рис. 6) называется *апоцентром* (A), а наиболее близкая — *перигентром* (P). Если в фокусе находится Солнце, то эти точки называются *афелием* и *перигелием*; для эллиптической орбиты вокруг Земли — *апогеем* и *перигеем*. Линия, соединяющая A и P , называется *линией апсид*.

Скорость движения тела P по эллиптической орбите (или, как говорят, *орбитальная скорость*) в соответствии со вторым законом Кеплера неравномерна. Вблизи перигея P движется быстрее, а вблизи апогея — медленнее. Строго этот закон формулируется так: *площади, описываемые радиусом-вектором* (отрезком прямой, сое-

диняющим S с P) на любом участке орбиты в равные промежутки времени, равны между собой, т. е. пропорциональны времени.

Другими словами, если мы возьмем на эллиптической орбите (рис. 7) отрезки пути P_1P_2 , P_3P_4 , P_5P_6 и др., которые тело P проходит за одно и то же время, то площади всех заштрихованных секторов равны между собой.

Период обращения тела P вокруг S при движении по эллиптической орбите согласно законам Кеплера равен

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{\mu M}},$$

где a — большая полуось орбиты, M — масса тела S . Заметим, что выше при

составлении уравнений движения S и P (стр. 23) мы пренебрегли влиянием P на S , т. е. пренебрегли массой m . Если же учесть и массу m , то для периода обращения P получится несколько более точное выражение

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{\mu(M+m)}}.$$

Если рассматривать движение тела P в пространстве вокруг S в системе координат, изображенной на рис. 1, то начальная скорость V_0 целиком определяет орбиту (эллиптическую, параболическую и гиперболическую) в пространстве. Имеются формулы, которые позволяют с помощью так называемых элементов орбиты (о них будет сказано ниже) вычислять координаты тела в любой момент времени.

Таким образом, если при рассмотрении движения планеты вокруг Солнца ограничиться лишь учетом притяжения Солнца и составить уравнения движения, соответствующие механической схеме задачи двух тел, то эти уравнения мы можем полностью решить. Этим решениям соответствуют или эллиптическое движение по законам Кеплера, или движение по параболе и гиперболе. Такое

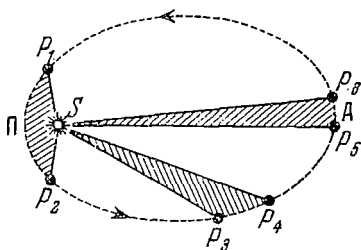


Рис. 7. Закон площадей при движении тела по эллиптической орбите.

движение называют в небесной механике *невозмущенным*, а соответствующую орбиту — *невозмущенной*.

Если ограничиться более или менее приближенным представлением движений планет, то полученных результатов вполне достаточно. Эти движения действительно описываются довольно хорошо законами Кеплера. Во времена Кеплера, когда наблюдения небесных светил велись невооруженным глазом, отклонения планет от эллиптического движения оставались почти незаметными. Сам Кеплер считал свои законы абсолютно точными.

Движения астероидов вокруг Солнца и спутников вокруг своих планет также хорошо соответствуют законам Кеплера.

Однако очевидно, что истинные движения в солнечной системе гораздо сложнее. Все планеты, их спутники, астероиды, кометы притягивают друг друга и отклоняют друг друга от невозмущенной орбиты. Эти отклонения называют в небесной механике *возмущениями*. Говорят, что планеты, астероиды, спутники, кометы испытывают возмущения.

Начиная с XVIII в. одной из основных задач небесной механики стало именно определение возмущений различных небесных тел солнечной системы.

Из сказанного ясно, что выбранная выше механическая схема движения планеты P вокруг Солнца S и соответствующие уравнения движения лишь грубо отражают истинную картину. Надо составить более точную механическую схему, учитывая кроме солнечного притяжения другие существенные силы.

Например, пусть рассматривается Сатурн. Из других планет наибольшее влияние на Сатурн оказывает Юпитер, так как его орбита расположена ближе всего к орбите Сатурна и масса Юпитера значительно больше, чем массы остальных планет. Вместе с тем сам Юпитер испытывает значительное влияние со стороны Сатурна. Если не учитывать влияние других планет и отождествить Солнце S , Юпитер P_1 , Сатурн P_2 с материальными точками, то мы приходим к механической схеме трех тел или, как говорят астрономы, к задаче трех тел (точнее, материальных точек), притягивающих друг друга по закону Ньютона.

Ускорение Юпитера в этой задаче состоит из ускорения W' к Солнцу и ускорения W'' к Сатурну. Сатурн испы-

тывает ускорения W_2' к Солнцу и W_2'' к Юпитеру (рис. 8). Все эти ускорения выражаются по второму закону механики через силы взаимного притяжения, зависящие в свою очередь от масс рассматриваемых тел и от расстояний между ними. Выразив проекции полного ускорения как P_1 , так и P_2 через действующие силы, получим уравнения движения задачи трех тел. Если мы хотим изучать движение именно Юпитера и Сатурна, а не вообще движение в задаче трех тел, то необходимо по астрономическим

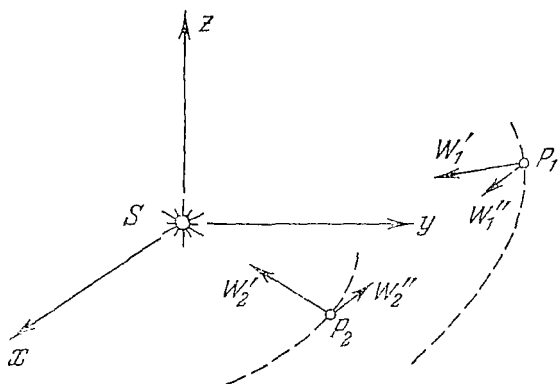


Рис. 8. Схема ускорений в задаче двух планет, движущихся вокруг Солнца.

наблюдениям определить их положение и скорость для какого-либо момента времени.

На этом, так сказать, астрономо-механическая часть проблемы движения Сатурна и Юпитера временно окончена (почему только временно, будет объяснено ниже). Теперь слово за математикой. Надо решить уравнения движения. Но оказывается, что эти уравнения гораздо сложнее, чем в случае задачи двух тел. Настолько сложнее, что, несмотря на все успехи высшей математики, мы не можем решить их в общем виде. Другими словами, мы не можем получить формулы, позволяющие вычислять положения тел P_1 и P_2 в пространстве для любого момента времени и при каких угодно начальных условиях (т. е. начальных положениях и скоростях). Мы не можем также описать словами характер всех движений, как это было возможно в задаче двух тел. Частично это можно объяснить

тем, что сами движения в этой задаче, если рассматривать произвольные тела с произвольными начальными положениями и скоростями, а не Сатурн и Юпитер, весьма сложны и разнообразны. Как говорят математики, семейство решений задачи трех тел несравненно богаче, чем задачи двух тел, где встречаются лишь эллиптические, параболические или гиперболические орбиты.

Однако нельзя считать положение совсем безнадежным. В небесной механике (с равным правом можно сказать в математике) разработаны методы — мы будем говорить об этом подробнее в разделе 4, — позволяющие находить приближенные, но достаточно точные решения уравнений задачи трех тел в ряде конкретных случаев. Эти решения находятся, например, в случае начальных условий и масс тел, заключенных в каких-то границах, в частности и таких, какие соответствуют движениям, близким по характеру к движениям планет или астероидов. Это значит, что эти решения охватывают лишь определенный узкий класс движений среди всех возможных в задаче трех тел. Или же можно найти приближенное решение при заданных конкретно (численно) начальных условиях. Тогда это решение представит даже не группу, а единственное движение среди бесчисленного множества других движений.

Все эти решения можно использовать для приближенных вычислений положений (координат) рассматриваемых небесных тел или определения свойств их орбит, но, к сожалению, — и в этом еще один существенный недостаток таких решений — лишь на сравнительно небольшом промежутке времени: иногда в течение лишь нескольких лет, иногда в течение 50—100 лет. Каковы будут орбиты этих тел в дальнейшем, сказать, как правило, нельзя.

Предположим, что математическая часть — решение уравнений движения — закончена. Это значит (только тогда ее можно считать по существу законченной), что даны формулы, позволяющие при тех или иных начальных условиях вычислять приближенно координаты тел P_1 и P_2 , или же даны непосредственно таблицы численных значений координат P_1 и P_2 для различных моментов времени. Такие таблицы астрономы называют таблицами движения.

Роль чистой математики на первых порах на этом заканчивается, но анализ исходной задачи движения взятых небесных тел еще нельзя считать законченным. Даль-

нейший ход решения зависит от той цели, которая ставилась в самом начале при рассмотрении этой задачи. Например, исследователя могут интересовать конкретные небесные тела, для которых составлялись уравнения движения, скажем, Юпитер и Сатурн. При этом мы можем стремиться составить точные таблицы их движений, т. е. предсказать точно положения этих планет в пространстве на какое-то число лет вперед, или стараться лучше понять некоторые свойства движений этих небесных тел, ранее ускользавшие от анализа.

Можно также интересоваться не именно данными небесными телами (Юпитером и Сатурном), но вообще целой группой небесных тел, близких по своим физическим свойствам и по свойствам своих движений к данным телам (например, всеми планетами солнечной системы). От полученных решений уравнений движения тогда требуется, чтобы они были применимы в равной степени к любым небесным телам из этой группы.

Но в любом случае на первый план после того, как чистая математика сделала свое дело, снова выступают астрономические наблюдения (временно преданные забвению, пока решались уравнения движения). Найденное решение сопоставляется с данными астрономических наблюдений конкретных небесных тел, которые или интересовали нас сами по себе, или же служили «представителями» целой группы небесных тел. Проводится, как говорят астрономы, сравнение теории с наблюдениями. И здесь принципиально возможны два случая.

Первый из них — когда теория сходится с наблюдениями, т. е. числа, полученные для конкретных небесных тел по решениям уравнений движения, согласуются с данными наблюдений (конечно, в пределах их точности) или же некоторые обнаруженные теоретические свойства решений действительно подтверждаются наблюдениями. Это именно тот случай, который означает наш успех. Это значит, что мы провели все этапы исследования хорошо (мы исключаем такой маловероятный случай, когда на каждом этапе допущены ошибки, которые затем компенсировали друг друга и дали в сумме правильный результат), т. е. что мы правильно выбрали механическую схему и уравнения движения, правильно определили начальные условия (положения и скорости небесных тел), достаточно точно, хотя и не абсолютно строго, решили уравнения движения.

К сожалению, так бывает очень редко. По существу, в силу диалектики жизни так не бывает никогда. Даже если при первом сопоставлении теории с наблюдениями расхождения как будто нет, то впоследствии с усовершенствованием наблюдений, с повышением их точности, накоплением новых данных, эти расхождения обнаруживаются.

Кроме того, как упоминалось выше, получаемые приближенные решения уравнений движения пригодны лишь на ограниченном отрезке времени. Другими словами, наступает время, когда и эти решения обязательно не будут соответствовать реальным движениям.

Если вспомнить историю развития астрономии, то так было всегда, во все эпохи, начиная с Птолемея. Действительно, когда Птолемей построил свою теорию эпициклов для планет, то эта теория в те времена позволяла достаточно хорошо вычислять положения планет на небе. Но к XV—XVI вв., когда точность наблюдений повысилась, расхождения между данными наблюдений и теорией Птолемея стали явными.

Таблицы движений планет, вычисленные в 1551 г. на основе теории Коперника, вначале очень хорошо соответствовали наблюдаемым движениям. Однако к концу XVI в. расхождения стали слишком заметными, что и побудило Кеплера к его исследованиям.

Таблицы движения планет, составленные Кеплером в 1627 г., и соответствующие эллиптические орбиты планет были в свое время очень хороши. Но, естественно, отклонения от эллиптических орбит (т. е. возмущения) накапливались, точность наблюдений росла и наступило время, когда таблицы Кеплера уже не могли никого удовлетворить. Расходились табличные и наблюдаемые положения, а также наблюдаемые свойства движений с законами Кеплера.

Такие примеры можно привести для любого этапа развития небесной механики. Таким образом, сама действительность заставляет рассматривать второй случай: построенная теория расходится с наблюдениями. Эти расхождения обнаруживаются или сразу, или через некоторый промежуток времени. Выше мы употребили по этому поводу слова «к сожалению», но, пожалуй, если их и стоит произносить, то лишь в адрес тех ученых (одного или многих), которые создавали теорию. Они много трудились,

надеясь построить хорошую теорию, возлагали на нее большие надежды и... получили безрадостный для себя результат. Что-то было сделано не так. Для науки же в целом, если исходить из общих ее перспектив, это даже хорошо. Иначе наука застыла бы в своем развитии, не двигалась бы вперед. Приведем опять один пример из далекого прошлого небесной механики.

Кеплер, анализируя движение Марса, далеко не сразу пришел к выводу, что планета движется по эллипсу. Сначала он выдвигал много других гипотез. Однажды Кеплер пришел к такой траектории, которая давала ошибку между теоретическим и наблюдаемым положением Марса в 8 минут дуги. Эта ошибка весьма мала, так как изменение положений светил на небе в 4 минуты дуги остается почти незаметным для невооруженного глаза (а ведь тогда еще телескопов не было). Было бы очень заманчиво не обратить внимания на такое расхождение. Но все же расхождение было налицо. И Кеплер без колебаний отбросил свою гипотезу, как ложную, не сожалея о тех колоссальных вычислениях, которые оказывались теперь бесполезными (напомним, что в те времена вычисления велись даже без логарифмов). Дальнейшие исследования Кеплера привели его к знаменитым законам. Если бы, однако, такого расхождения не было, то Кеплер мог бы на этом остановиться.

Следовательно, в открытии законов Кеплера оказалась «виновной» ошибка в 8'.

Сам Кеплер писал: «... если бы я желал пренебречь 8' долготы, то давно бы уже в достаточной мере исправил гипотезу, раскрытую в главе XVI (т. е. теорию Коперника.— *Прим. авт.*). Но так как пренебречь невозможно было, то эти самые 8' повели к полному преобразованию астрономии...»

Возникает вопрос, чем обусловлены расхождения между теорией и наблюдениями?

Если исключить прямые ошибки (конечно, когда мы говорили о пользе для науки, то не имели их в виду), например при составлении уравнений движения, при различных математических вычислениях, очень сложных, длинных, то возможны приводимые ниже причины расхождений:

1) Исходная механическая схема движения выбрана неправильно в том смысле, что оказываются неучтенными

все силы, влияющие заметным образом (соответственно с точностью наблюдений и вычислений) на движение рассматриваемых небесных тел.

2) Плохо решены уравнения движения, т. е. получено слишком грубое для данного случая приближенное решение.

3) Неправильно определены исходные начальные условия (положения и скорости небесных тел).

4) Неправильно выбраны массы данных небесных тел, в результате чего решения уравнений движения также будут расходиться с истинными движениями.

Каждая из этих причин в равной степени существенна и все они действуют совместно. Когда факт расхождений установлен, то сразу весьма трудно решить, из-за чего именно это случилось. Мы уже не говорим о том, что обычно при этом прежде всего начинают искать прямые ошибки в формулах и вычислениях. Мы предположили выше, что их нет, хотя, к сожалению (и здесь уже без всяких оговорок), они бывают часто. Нахождение решений сложных уравнений движения небесной механики — не просто трудная, но титаническая (это не преувеличение) работа. Можно смело сказать, что ни в одной из других областей науки нет таких больших формул и вычислений, обращение с которыми требует столько терпения, внимания, тщательности. Допустить ошибку здесь очень легко.

В наши дни на помощь приходят электронные вычислительные машины. Они почти целиком снимают вопрос об ошибках вычислений (правда, бывает, что и машины ошибаются). С их помощью можно получить достаточно точные численные решения уравнений движения, и это позволяет полностью проверить причину 2), т. е. проверить, достаточно ли точно мы решили рассматриваемые уравнения движения. Оказывается возможным также проверить с помощью вычислительных машин причины 3) и 4), т. е. точность начальных условий и значений масс небесных тел. Собственно говоря, на этом пути, только без применения вычислительных машин, и получены более или менее точные значения масс тел солнечной системы, о чем мы будем говорить ниже.

Пусть все три последние причины устранены (хотя это сказать гораздо легче, чем сделать, особенно в отношении причины 2). Остается, таким образом, первая причина.

Напомним, что мы в качестве примера рассматривали движение Сатурна и Юпитера. Мы выбрали для них схему

задачи трех тел. Но, конечно, сразу видно, что такая схема не учитывает все существенные, на первый взгляд, силы. Ведь другие планеты также должны оказывать влияние и на Юпитер и на Сатурн, хотя и значительно меньшее. Так что, собственно говоря, если иметь в виду именно этот конкретный случай, то весь предыдущий разговор лишь нужен для пояснения общего хода постановки задач в небесной механике. Но имеется целый ряд случаев (например, когда рассматриваются астероиды), где задача трех тел вполне хорошо, как будто, соответствует реальным движениям, и вопрос о целесообразности учета притяжения других планет не так просто решить сразу.

Для Сатурна и Юпитера наиболее желательной была бы схема, в которой все известные планеты движутся под влиянием Солнца и взаимного притяжения. Мы получим тогда задачу о движении десяти тел (девять планет плюс Солнце), и такая задача будет действительно учитывать все существенные силы, действующие на планеты.

Конечно, и эта схема не совсем точная, так как остаются в ней без учета астеронды, спутники планет, но, повторяем, нельзя объять необъятное и в этом нет необходимости, так как влияние астероидов и спутников на планеты ничтожное (если исключить Луну, которая является уникальным спутником в солнечной системе; обычно в задачах о движении планет рассматривают не саму Землю, а систему Земля — Луна). При этом надо сознаться, что и задача о движении девяти планет с полным учетом их взаимного влияния оказывается в настоящее время практически необозримой. Если написать полностью уравнения движения девяти планет солнечной системы, то даже современные, самые быстродействующие вычислительные машины не могут решить эти уравнения для сколько-нибудь значительного интервала времени. (Конечно, в будущем появятся еще более совершенные машины, которые сделают это возможным.) Здесь приходится выбирать, так сказать, «золотую середину»: не слишком грубую схему, чтобы учесть, по возможности, все существенные силы, и не слишком сложную, чтобы не встретились непреодолимые практические трудности при решении уравнений движения. Например, в случае Юпитера и Сатурна задача пяти тел (Солнце — Юпитер — Сатурн — Уран — Нептун), притягивающих друг друга по закону Ньютона, практически доступна и дает хорошие результаты.

После того как механическая схема движения рассматриваемых небесных тел уточнена, все повторяется как бы заново. Опять составляются уравнения движения, но уже другие, уточненные, опять они решаются и опять полученные решения сравниваются с наблюдениями. Более вероятно, что на этом этапе расхождения между теорией и наблюдениями будут меньше, но, конечно, полностью их нельзя исключить. Такой процесс в принципе может быть повторен сколько угодно раз.

Из всего сказанного видно, что при изучении движений небесных тел можно выделить три этапа: 1) выбор механической схемы и составление уравнений движения; 2) решение уравнений движения; 3) сопоставление полученных решений с данными наблюдений.

Что касается механических схем в небесной механике, то широко применяются задачи двух тел (например, Солнце — планета, Солнце — астероид, планета — спутник), трех тел (например, Солнце — планета — астероид, Солнце — планета — ее спутник), а также большего числа тел. Среди всех механических схем можно выделить так называемую ограниченную задачу трех тел, суть которой заключается в следующем. Если рассматривают движение какого-нибудь астероида, то, поскольку наибольшее влияние на него оказывает Юпитер, ограничиваются обычно задачей трех тел: Солнце — Юпитер — астероид. Но астероиды имеют очень малые массы, поэтому Юпитер испытывает ничтожное влияние со стороны астероида, и это влияние оставляют без внимания. Получают задачу, в которой астероид притягивается Солнцем и Юпитером, а сила притяжения последнего астероидом, точнее ускорения от такого притяжения, не учитывается. Такая задача трех тел называется ограниченной.

При исследовании движения спутников вокруг планет приходится, как правило, учитывать форму планет, поскольку они не имеют точной сферической формы и не притягивают так, как материальные точки. Получается схема: спутник + планета, не отождествляемая с материальной точкой. Встречаются в небесной механике также и другие схемы.

Затронем также следующий вопрос. До сих пор мы говорили только о силах взаимного притяжения между небесными телами. Однако в определении небесной механики как науки, изучающей движения небесных тел, от-

нюдь не оговаривается, что должны рассматриваться лишь силы притяжения по закону Ньютона и нельзя рассматривать другие силы. Пока мы имеем дело с планетами, их спутниками (естественными спутниками), астероидами солнечной системы, то действительно, никакие другие силы, кроме сил взаимного притяжения, на движение этих тел сколько-нибудь заметно не влияют. Но когда мы переходим, например, к искусственным спутникам Земли, то учет сил притяжения явно недостаточен. Приходится учитывать сопротивление атмосферы, давление солнечного излучения, электромагнитные силы, вызываемые магнитным полем Земли, взаимодействующим с металлическими частями спутника, и т. д. В этом случае механическая схема движения может быть весьма сложной.

Второй этап — решение уравнений движения — занимает исключительно важное и центральное место в небесной механике. Все развитие небесной механики было неразрывно связано с развитием методов высшей математики, методов решения и исследования так называемых дифференциальных уравнений. По существу, эта наука заслуживает скорее названия небесной математики, а не механики.

База высшей математики, заложенная Ньютоном в его «Началах», была создана в ходе рассмотрения проблем изучения движения небесных тел. Великие математики XVIII—XIX вв. Клеро, Даламбер, Эйлер, Лагранж, Лаплас и другие основатели небесной механики строили ее здание на базе развиваемых ими же методов высшей математики. Ряд разделов высшей математики также обязан своим возникновением проблемам небесной механики. Одним словом, нельзя достичь успеха в небесной механике без фундаментального знания многих разделов высшей математики.

В силу подобной специфики задач в небесной механике выделилось, так сказать, теоретическое направление, где ставятся математические проблемы, связанные с исследованием уравнений движения без всякой непосредственной связи с конкретными небесными телами. Рассматриваются отвлеченные, абстрактные задачи трех тел, задачи многих тел (как говорят, n тел) с целью выяснения общих свойств их решений, выделения определенных групп решений с теми или иными свойствами, с целью разработки наиболее целесообразных методов решения и т. д. Собственно

говоря, под методами небесной механики, о которых мы будем говорить ниже, понимаются различные методы решения уравнений движения, приспособляемые именно к конкретным небесным телам и учитывающие специфику их движения. Например, в случае планет используется тот факт, что все они движутся по орбитам, близким к окружностям и лежащим почти в одной и той же плоскости, и что возмущения каждой планеты все же не очень велики в течение ряда оборотов этой планеты вокруг Солнца.

Третий этап — сопоставление теории с наблюдениями — очень важен, если речь идет об изучении движения конкретных небесных тел. Без этого теория как бы повисает в воздухе и остается лишь красивой математической абстракцией. В последнее время роль наблюдений часто заменяет численное решение уравнения движения на электронных вычислительных машинах. Это оказывается иногда даже более удобным, так как нужные наблюдения трудно получить или же они отягощены чисто астрономическими ошибками, мешающими проверке качества самих решений уравнений движения.

Таковы задачи небесной механики, их постановка, пути их анализа. Теперь мы познакомимся подробнее с самими небесными телами, движение которых изучает небесная механика.

3. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА — ЧАСТЬ АСТРОНОМИИ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Э л е м е н т ы о р б и т н е б е с н ы х т е л. Как мы говорили в разделе 2, чтобы описать движение какого-либо небесного тела, всегда пользуются той или иной системой координат. Когда рассматривается движение небесных тел в солнечной системе, обычно в качестве начала координат берется центр Солнца, а в качестве основной координатной плоскости — плоскость *эклиптики*. Это — та плоскость, в которой происходит движение Земли (точнее, центра масс системы Земля — Луна) относительно Солнца. Третья ось координат (ось z) направлена перпендикулярно к плоскости эклиптики, причем положительное направление на ней выбирается таким образом, что для воображаемого наблюдателя, смотрящего на солнечную систему с какой-нибудь точки этой оси в сторону начала

координат, движения планет происходят против часовой стрелки. Такая система координат, а также орбита небесного тела относительно Солнца называются *гелиоцентрическими*. Если начало координат совпадает с центром Земли, то система координат называется *геоцентрической*. Например, движение Марса и Венеры рассматривается в гелиоцентрической системе координат, а движение Луны — в геоцентрической системе координат.

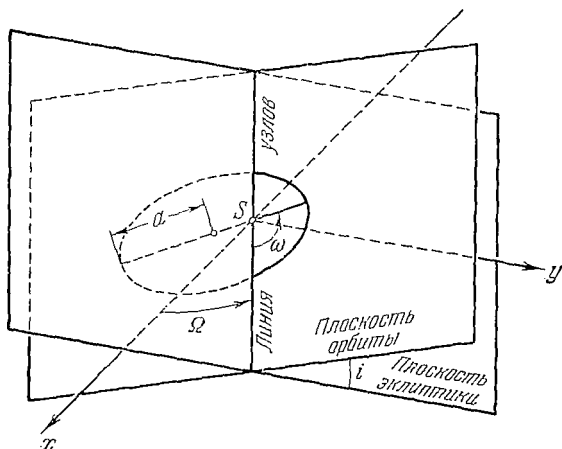


Рис. 9. Угловые элементы орбит небесных тел.

Положение планеты или спутника в пространстве полностью определено, если известны так называемые элементы орбиты. Их всего шесть: два элемента определяют положение плоскости орбиты в пространстве (относительно плоскости эклиптики), один элемент определяет ориентацию самой орбиты в своей плоскости, два элемента характеризуют форму и размеры орбиты и, наконец, один элемент дает положение небесного тела на орбите.

Рассмотрим более подробно этот вопрос. Положение орбитальной плоскости определяется двумя угловыми элементами: *наклоением орбиты i* и *долготой восходящего узла орбиты Ω* (рис. 9). Наклонение орбиты — это угол между плоскостью орбиты и основной координатной плоскостью (например, плоскостью эклиптики). Линия пересечения плоскости орбиты и плоскости эклиптики называется *линией узлов*. Допустим, что ось x выбрана. Тогда

для полного определения положения орбитальной плоскости достаточно еще знать угол между осью x и линией узлов (заметим, что таких углов два, поэтому для определенности на линии узлов берется та точка пересечения орбиты с плоскостью эклиптики, в которой планета переходит из южной в северную полусферу, — восходящий узел). Этот угол и называется долготой восходящего узла. Обычно в качестве оси x принимается прямая, на которой находятся Солнце и Земля в день весеннего равноденствия.

Ориентация орбиты в своей плоскости определяется одним угловым элементом — так называемым *угловым расстоянием перигелия от узла* ω , которое представляет собой угол между линией узлов и направлением на перигелий орбиты. Иногда ориентация орбиты в своей плоскости определяется *долготой перигелия* $\pi = \Omega + \omega$.

Размеры и форма орбиты полностью определяются, если нам известны большая полуось a и эксцентриситет e , который характеризует сплюснутость эллипса.

Наконец, необходимо знать положение светила на орбите в некоторый момент времени. Очень часто в качестве шестого элемента принимается момент прохождения тела через перигелий орбиты.

Если семья Солнца состояла бы только из двух тел (Солнце и планета), то планета вечно двигалась бы вокруг Солнца по кеплеровской орбите с постоянными элементами. Но в действительности мы встречаемся не с задачей двух тел (точнее, двух матеряальных точек), а с задачей многих тел, поэтому с течением времени из-за взаимного притяжения планет все элементы орбиты подвергаются непрерывным изменениям.

Движение планеты на протяжении одного или нескольких оборотов вокруг Солнца с большой точностью представляется кеплеровскими элементами, но на больших промежутках времени притяжение других планет «искажает» эллиптическое движение, и путь планеты в пространстве является сложной незамкнутой кривой, витки которой похожи на эллипсы. Поэтому орбиту можно представить как эллипс с изменяющимися элементами. Постепенно изменяется и положение эклиптики в пространстве, поэтому в астрономических ежегодниках или других изданиях указывается также *эпоха*, к которой относятся приведенные элементы. Например, 1950 год, январь, 0 суток, 0 часов всемирного времени.

Астрономические постоянные. В астрономии весьма большую роль играют некоторые постоянные численные величины, которые называются *астрономическими постоянными*. К ним относятся элементы орбит планет и спутников, массы тел солнечной системы, постоянная тяготения, среднее расстояние от Земли до Солнца и т. д. Среди всех астрономических постоянных имеется небольшое количество величин, через которые легко выражаются все остальные. Первые называются *фундаментальными постоянными астрономии*, а остальные — *производными*. Выбор фундаментальных постоянных может быть, вообще говоря, различным, но специалисты-астрономы построили такую систему постоянных, чтобы, с одной стороны, наиболее часто встречающиеся величины выражались возможно более простыми численными величинами, а с другой стороны, чтобы производные постоянные получались из наиболее простых соотношений.

К фундаментальным постоянным астрономии относится постоянная тяготения. Выше мы говорили, что постоянная тяготения (или гравитационная постоянная) в системе (см, г, сек) равна $f = 6,670 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г сек}^2$, но в астрономии это значение гравитационной постоянной неудобно. Немецкий математик Гаусс (1777—1855) предложил определять f , пользуясь следующей системой единиц: за единицу массы принимается масса Солнца, за единицу расстояния — среднее расстояние от Земли до Солнца, за единицу времени — средние солнечные сутки. В этой системе единиц постоянная тяготения равна

$$f = 0,000295912.$$

Среднее расстояние от Земли до Солнца (среднее гелиоцентрическое расстояние Земли) — это вторая фундаментальная астрономическая постоянная. Она называется *астрономической единицей* и принята равной 149 500 000 км (сокращенно обозначается а. е.). В наше время появилась возможность определить величину астрономической единицы с помощью радиолокационных измерений, которые дают более точное значение. По этим данным 1 а. е. = 149 544 455 ± 316 км, однако это значение пока не принято в качестве фундаментальной постоянной.

Большая полуось планетной орбиты a , постоянная тяготения f , масса планеты m , выраженная в долях массы Солнца, и ее средняя угловая скорость относительно

Солнца n связаны простым соотношением

$$n^2 a^3 = f(1 + m).$$

Эта формула показывает, что изменение одной из величин приводит к изменению других, поэтому вполне уместен и важен следующий вопрос: поскольку в процессе развития науки мы получаем все более точные значения некоторых величин (например, n), то не приводит ли это к путанице?

По международному соглашению 1896 г. в приведенной формуле считается неизменным значение $f=0,000295912$, а все остальные уже получаются из формулы. Например, значение массы Земли m , которым пользовался Гаусс, было на 7% меньше современного значения, поэтому $a=1,00000003$ а. е., т. е. среднее расстояние от Земли до Солнца, вообще говоря, не равно астрономической единице. Средние угловые скорости планет (так называемые средние суточные движения), а в конечном счете и периоды обращения планет вокруг Солнца, определяются из обработки высокоточных наблюдений.

К фундаментальным постоянным относятся также средний радиус Земли $R=6371,269$ км, ускорение силы тяжести на средней широте $g=979,768$ см/сек², скорость света $c=299\,860$ км/сек, масса Луны $m_{\text{л}}=1/81,366$ массы Земли.

В таблице приведены значения некоторых производных астрономических постоянных, к которым в дальнейшем мы неоднократно будем возвращаться.

В 1964 г. на съезде Международного астрономического союза была утверждена новая система астрономических постоянных, которая будет введена после того, как исчерпаются изданные астрономические ежегодники.

Выше мы говорили, что небесная механика изучает движение всевозможных небесных тел, но было бы ошибкой думать, что движение всех известных в настоящее время небесных тел изучено в одинаковой степени полно и всесторонне. Диалектика развития науки такова, что в первую очередь подвергаются исследованию те объекты, о которых имеется наиболее полный наблюдательный материал; ведь открытие тех или иных закономерностей более вероятно в том случае, когда исследователи владеют большим количеством наблюдений, опытов или измерений. В небесной механике такими объектами являются представители многочисленного семейства Солнца, обогатившегося

Элементы орбит больших планет

Название	Наклонение орбиты к эклиптике	Долгота восходящего узла	Долгота перигелия	Средняя долгота	Большая полуось орбиты	
					в астрономических единицах	в млн. км
Меркурий	7°00'12"	47°30'05"	76°21'59"	20°24'01"	0,387099	57,9
Венера	3 23 38	76 02 59	130 35 10	258 31 50	0,723322	108,1
Земля	0 00 00	—	101 44 12	99 55 39	1,000000	149,5
Марс	1 51 00	49 01 04	334 46 14	276 15 27	1,523688	227,8
Юпитер	1 18 25	39 44 28	13 11 41	68 56 26	5,202803	777,8
Сатурн	2 29 28	113 02 43	91 40 34	273 37 05	9,538843	1426,1
Уран	0 46 22	73 38 28	169 31 47	12 20 01	19,190978	2869,1
Нептун	1 46 35	131 00 31	44 01 07	150 59 03	30,070672	4495,7
Плутон	17 18 48	108 57 16	202 28 34	121 24 14	39,517774	5903,9

Название	Эксцентриситет орбиты	Период обращения		Среднее суточное движение	Средняя скорость на орбите, км/сек	Расстояние от Земли, млн. км	
		в сидерических годах	в средних сутках			наименьшее	наибольшее
Меркурий	0,205620	0,24084	87,9693	14 732",4199	48,89	82	217
Венера	0,006806	0,61519	224,7008	5 767",6698	35,00	40	259
Земля	0,016738	1,00000	365,2564	3 548",1928	29,77	—	—
Марс	0,093340	1,88082	686,9797	1 886",5186	24,22	56	400
Юпитер	0,048387	11,86178	4 332,5879	299",1284	13,07	591	565
Сатурн	0,055786	29,45660	10 759,2008	120",4550	9,65	1 199	1 653
Уран	0,047129	84,01209	30 685,93	42",2366	6,80	2 586	3 153
Нептун	0,008553	164,78201	60 187,65	21",5327	5,43	4 309	4 682
Плутон	0,248640	248,421	90 737,2	14",2830	4,74	4 303	7 517

за последние годы равноправными членами, созданными человеческим гением. Поэтому сейчас мы познакомим читателя с основными телами солнечной системы.

С о л н ц е — это геометрический и механический центр нашей планетной системы. Оно представляет собой гигантский раскаленный самосветящийся газовый шар колоссальных размеров. Диаметр Солнца в 109 раз больше диаметра Земли и равен 1 391 000 км. Если поместить Землю в центре Солнца, то Луна расположилась бы внутри, на расстоянии от центра, равном всего $\frac{1}{3}$ его диаметра. Огромное число характеризует его массу, которая равна 330 000 массам Земли, и если бы мы захотели выразить ее в килограммах, то получили бы следующее число: 2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 кг. Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца в 28 раз больше, чем на земной поверхности. Это значит, что вес взрослого человека составлял бы на солнечной поверхности приблизительно 2 т, а пудовую гирию никто из людей не смог бы там поднять. Но приведенная выше впечатляющая статистика не раскрывает во всем величии могущество нашего Солнца.

Солнце представляет собой непрерывный колоссальный излучатель энергии, которая определяет тепловой режим и на Земле, и во всей солнечной системе. Оно излучает не только видимые глазом световые лучи, но и другие электромагнитные волны: ультрафиолетовые лучи, радиоволны, рентгеновские лучи, смертоносные космические лучи. Установлено, что в излучении Солнца наблюдается 11-летняя периодичность.

Солнечная активность влияет на состояние земной атмосферы и вызывает многие явления в ней. Например, идущие от Солнца потоки ионизованных атомов водорода и ультрафиолетовое излучение при взаимодействии с атмосферой порождают полярные сияния, возмущения магнитного поля Земли (магнитные бури) и нарушают коротковолновую связь земных радиостанций.

Исследование солнечной деятельности ведется по международной программе многими обсерваториями, которые входят в так называемую «службу Солнца».

М е р к у р и й — самая близкая к Солнцу и самая маленькая из больших планет. Но прежде чем рассказать о Меркурии, мы хотим решить следующий вопрос: существуют ли планеты, орбиты которых целиком расположены

внутри орбиты Меркурия (среднее расстояние Меркурия от Солнца равно 57,9 млн. км или 0,387099 а. е.)?

Так как Меркурий в своем видимом движении вокруг Солнца отходит от последнего не более чем на 18° , то эффективные поиски планет внутри орбиты Меркурия производились лишь во время полных солнечных затмений. Американские астрономы Перрен, Кэмпбелл и Тремплер производили тщательное фотографирование неба во время затмений, имевших место между 1900 и 1920 гг., и не обнаружили никаких планет. Следует, однако, заметить, что использованные ими астрономические приборы давали возможность наблюдать тела диаметром более 60 км. Отсюда можно сделать вывод, что если и имеются небесные тела, которые вращаются вокруг Солнца на расстоянии, меньшем чем Меркурий, то их размеры весьма малы.

Но что собой представляет планета Меркурий? Выше мы говорили, что Меркурий — наименьшая по размерам и массе среди больших планет. В прошлом веке американский астроном Ньюкомб, который по праву считается одним из создателей теории движения больших планет (таблицы Ньюкомба и сейчас используются для составления астрономических ежегодников, которые содержат координаты больших планет в определенные моменты времени, так называемые «эфемериды»), впервые уверенно определил массу Меркурия. По его расчетам масса Меркурия составляет $1/6000000$ массы Солнца. Уже в этом столетии было произведено несколько новых определений массы Меркурия учеными различных стран. В настоящее время можно считать, что его масса составляет $1/6100000$ — $1/6400000$ массы Солнца.

Детали, которые наблюдаются на поверхности планеты с помощью телескопов, подобны деталям лунной поверхности, видимым невооруженным глазом, причем на диске Меркурия относительно долго наблюдаются одни и те же области. Современные радиолокационные наблюдения Меркурия позволили определить период его осевого вращения относительно звезд, который равен 59 ± 7 суткам, однако из-за быстрого движения Меркурия вокруг Солнца меркурианские солнечные сутки (промежуток времени между двумя восходами Солнца) равны 220 ± 40 суткам. Сравнивая карты поверхности планеты, составленные в разное время, можно сделать вывод, что ось вращения наклонена к плоскости эклиптики приблизительно на 83° . Отсутствие

заметной атмосферы обуславливает постоянную яркость планеты. Измерения теплового излучения поверхности Меркурия с помощью современных приборов показывают, что в центральных освещенных областях диска температура колеблется от $+360^{\circ}\text{C}$ до $+480^{\circ}\text{C}$ в зависимости от гелиоцентрического расстояния планеты. Радиоастрономические наблюдения показали, что на теневой стороне планеты температура достигает $+15^{\circ}\text{C}$.

Приведенные данные показывают, что существование жизни в нашем понимании на Меркурии невозможно, и поэтому в будущем, когда к Меркурию отправятся первые космонавты, им придется решать сложнейшие задачи, связанные с обеспечением нормальной жизнедеятельности.

Венера — самое яркое после Луны и Солнца небесное тело. Как и Меркурию, Венере присуща смена фаз, обнаруженная еще Галилеем. В 1761 г. Венера в своем движении вокруг Солнца находилась точно между Землей и Солнцем (иногда говорят: «проходила по диску Солнца») и М. В. Ломоносов, наблюдая это редкое явление, заметил, что Венера окружена мощной атмосферой. Венера движется вокруг Солнца почти по круговой орбите с радиусом, равным 108,3 млн. км. Эксцентриситет орбиты равен всего 0,007, а плоскость орбиты наклонена к плоскости эклиптики на $3^{\circ}24'$. Определения массы Венеры, выполненные многими астрономами на протяжении последнего столетия, позволяют сделать вывод, что ее масса в 408 000 раз меньше массы Солнца. На Венере год продолжается около 225 суток, т. е. 7,5 месяца. Ее диаметр меньше земного лишь на 400 км и равен 12 350 км.

К сожалению, в настоящее время мы не располагаем окончательной информацией о физических условиях Венеры. Мощная, богатая облаками атмосфера совсем скрывает от нас поверхность планеты, и разные методы исследования дают иногда, казалось бы, противоречивые результаты. Например, определение температуры освещенной Солнцем поверхности с помощью термопары дает величину, равную $+100^{\circ}$ — $+110^{\circ}\text{C}$, а радиоастрономические измерения дают температуру выше $+400^{\circ}\text{C}$. Это объясняется, по-видимому, тем, что разные методы дают температуры различных слоев атмосферы. Очень трудным является вопрос об измерении «суток» на Венере. В последние годы в научной литературе приводились данные о различной величине продолжительности «суток» на Венере, от

нескольких земных суток до 250. По-видимому, последнее число более обоснованно. Сопоставляя различные детали, обнаруженные на диске планеты, можно сделать вывод, что ось вращения планеты перпендикулярна к плоскости орбиты. Нет достаточно полной информации о химическом составе атмосферы Венеры. Исследования, выполненные американскими учеными Россом и Муром на аэростате, показали, что атмосфера Венеры содержит в 4 раза больше водяных паров, чем земная стратосфера. Советский астроном Н. А. Козырев подтвердил присутствие азота в атмосфере планеты, а также обнаружил небольшое количество нейтрального и ионизованного кислорода, но в основном там преобладает углекислый газ.

В 1964 г. советский ученый А. Д. Кузьмин и американский ученый Б. Кларк доказали, что радиоволны, идущие от Венеры, образуются не в ионосфере планеты, как полагали многие ученые раньше, а рождаются на ее поверхности. Это позволило установить, что, по крайней мере, верхний слой поверхности Венеры напоминает некоторые сухие земные породы. Раньше выдвигалось предположение, что на Венере существуют моря, так как отражательная способность поверхности планеты подобна отражательной способности земных морей, но теперь, учитывая очень высокую температуру поверхности Венеры, от такого предположения приходится отказаться.

Один из актуальных вопросов современной астрономии — это изучение магнитных полей планет. С помощью специального прибора — магнитометра, установленного на американском космическом корабле «Маринер-2», удалось установить, что заметного магнитного поля у Венеры нет, а отсюда следует, что у Венеры, по-видимому, нет радиационных поясов.

Система Земля — Луна представляет собой уникальное явление в солнечной системе. Дело в том, что ни одна из планет, кроме Земли, не имеет такого относительно большого спутника. Из-за взаимного притяжения и Земля и Луна вынуждены двигаться по очень сложным орбитам, поэтому при построении теории движения Земли и Луны, кроме общих трудностей, которые дальше мы специально обсудим, имеются и свои специфические трудные проблемы. Наиболее точные определения массы Земли получают исследованием возмущений в движении малой планеты Эрос, обусловленных притяжением со стороны

Земли. Это объясняется тем, что Эрос, двигаясь вокруг Солнца, подходит сравнительно близко к Земле, а это позволяет производить очень точные наблюдения. В большинстве научных работ принимается, что масса Земли составляет $1/328427$ часть массы Солнца, а масса Луны в 81,366 раз меньше массы Земли. Нам хорошо известно, как выглядит Луна, по крайней мере для земного наблюдателя, но вопрос о том, какой вид имеет Земля «со стороны», по нашему мнению, представляет интерес, тем более, что отважным космонавтам уже посчастливилось посмотреть нашу планету с высот 200—500 км. На фотографиях, снятых с такой высоты, отчетливо видны контуры материков, покрытые снегом горные вершины, песчаные пустыни, большие города, озера и реки. В большинстве случаев суша выглядит более светлой благодаря ее большей отражательной способности (отражается в среднем более 10% от общего количества световой энергии), но иногда, в зависимости от состояния водной поверхности и от условий получения снимков, ярче освещенной делается водная гладь. На фотографиях выделяются системы облаков, связанные с крупномасштабными циклонами и с местными образованиями, большие спиралевидные области — это массы холодного воздуха, вторгнувшиеся в системы облаков.

С помощью искусственных спутников удалось выполнить весьма разнообразную научно-исследовательскую программу по изучению поля притяжения Земли, магнитного поля, радиационных поясов, структуры земной атмосферы и многих других проблем. Искусственные спутники Земли оказались весьма эффективным средством для решения такой важной задачи небесной механики, как определение сжатия Земли. Под сжатием Земли мы понимаем величину α , равную

$$\alpha = \frac{R_0 - R_p}{R_0},$$

где R_0 — экваториальный и R_p — полярный радиусы Земли. Из обработки наблюдений искусственных спутников Земли получено, что $\alpha = 1/298,2$.

Марс — планета, которая вызывает в наши дни наибольший интерес и у специалистов-астрономов, и у любителей. Она хранит много волнующих тайн и основная из них: существует ли в настоящее время органическая жизнь на планете, а если не существует сейчас, то сущест-

вовала ли она раньше? Постановка такого вопроса закономерна, и для подтверждения этого напомним читателю основные динамические и физические данные, касающиеся Марса. Он движется вокруг Солнца по довольно вытянутой орбите, поэтому его гелиоцентрическое расстояние изменяется в широких пределах (от 206 до 249 млн. км). Расстояние от Земли до Марса изменяется от 55,5 млн. км во время великих противостояний до 400 млн. км. Диаметр Марса почти в 2 раза меньше земного, а его масса примерно в 9 раз меньше массы Земли (по последним исследованиям американского астронома Клеменса она составляет $1/3088000$ часть массы Солнца). Из-за большой отдаленности Марса от Солнца он получает света и тепла приблизительно в 2 раза меньше, чем Земля. Гелиоцентрическое расстояние Марса однозначно определяет продолжительность «марсианского года», которая оказывается равной 687 суткам. Ось вращения Марса наклонена к плоскости орбиты под углом 67° , а это значит, что на Марсе, как и на Земле, происходит смена времен года, с той лишь разницей, что продолжительность каждого сезона примерно в 2 раза больше земных сезонов. Марсианские сутки продолжаются 24 часа 37 минут. Достаточно хорошо изучена весьма разреженная атмосфера Марса, которая содержит в 2 раза больше углекислого газа, чем атмосфера Земли, и не содержит большого количества водяных паров. Поэтому Марс — единственная планета с прозрачной атмосферой, в силу чего удастся достаточно хорошо изучить излучение поверхности планеты. Если для определения температуры используется теоретическая формула (так называемый закон Стефана — Больцмана), то получается, что температура поверхности Марса на 19° выше температуры, измеренной с помощью термопары, и составляет для подсолнечной точки на экваторе планеты $+35^\circ$ С. Следовательно, на экваторе в подсолнечной точке температура достигает $+15^\circ$ — $+20^\circ$ С (некоторая часть колебаний температуры объясняется изменением гелиоцентрического расстояния планеты).

Удивительное явление представляет собой изменение окраски поверхности планеты. На поверхности видны темные области, которые в свою очередь состоят из более мелких пятен, размером до 60 км. Эти области с течением времени меняют и свои размеры и свою окраску, причем иногда можно установить какую-то закономерность в их

эволюции, а иногда эти изменения случайны и неожиданны. На поверхности и в атмосфере планеты происходят пылевые бури, и интересно заметить, что они чаще всего бывают весной в южном полушарии и вблизи прохождения планетой перигелия орбиты. Так было летом 1956 г., когда в течение месяца интенсивность пылевой бури несколько раз достигала максимума. В атмосфере Марса часто можно обнаружить белые и синие облака, при этом большие белые облака имеют тенденцию появляться над определенными областями планеты. Их размеры достигают 100 км.

Иногда полярные области планеты одеваются в белый наряд «полярными шапками». Яркость полярной шапки неоднородна; она состоит из ярких и темных областей, видны также полосы. Эти детали непрерывно изменяются как по форме, так и по цвету. Шапка разрушается неодинаково, и это объясняется, по-видимому, пересеченностью рельефа поверхности.

Ценные результаты получены в 1965 г. с помощью аппаратуры, установленной на американской межпланетной станции «Маринер-4», которая прошла на расстоянии около 9000 км от Марса. Четкие фотографии некоторых районов позволяют сделать вывод, что поверхность планеты подобна лунной. Можно предполагать, что на Марсе около 10 000 кратеров, причем некоторые из них имеют очень большие размеры. Магнитометры не обнаружили существования магнитного поля достаточно большой интенсивности, и можно думать, что Марс не окружен радиационными поясами. Были получены и многие другие результаты.

Таковы вкратце данные о загадочной планете Марс, и, конечно, их недостаточно для того, чтобы дать исчерпывающий ответ на вопрос о наличии жизни на этой планете. Но, несомненно, в ближайшем будущем в нашем распоряжении будет более полная научная информация по этому вопросу.

Марс имеет два спутника: Фобос диаметром 16 км и Деймос диаметром 8 км, открытые в 1877 г. Период обращения Деймоса вокруг Марса — 30 часов 18 минут, а Фобоса — 7 часов 39 минут, т. е. в 3 раза меньше марсианских суток. Последнее обстоятельство приводит к тому, что на марсианском небосводе Фобос движется с запада на восток. С точки зрения небесной механики спутники Марса являются весьма интересными объектами.

Ю п и т е р — самая крупная планета солнечной системы. Диаметр планеты равен 142 867 км, а масса в 317 раз больше массы Земли. Отсюда вытекает, что его средняя плотность лишь немного превосходит плотность воды. Эта гигантская планета обладает относительно быстрым вращением вокруг собственной оси. Сутки на Юпитере длятся немногим менее 10 часов, причем экваториальные области имеют большую скорость, чем околополярные (периоды вращения соответственно 9 часов 50 минут 30 секунд и 9 часов 55 минут 40 секунд). Температура освещенных верхних слоев атмосферы равна примерно -120°C , а в неосвещенных районах еще ниже. Трудно определить реальную температуру поверхности планеты, так как Юпитер окружен очень мощной атмосферой, богатой метаном и аммиаком. Такие низкие температуры объясняются тем, что Юпитер обращается вокруг Солнца на расстоянии в 5,2 раза большем, чем Земля, и поэтому солнечной энергии получает раз в 25 меньше. Год на Юпитере равен 11,9 земного года. Юпитер является излучателем радиоволн.

Двенадцать спутников вращаются вокруг планеты на различных расстояниях по различным орбитам. Четыре из них (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто), открытые Галилеем, имеют внушительные размеры: диаметр Ио 3550 км, Европы — 3100 км, Ганимеда — 5600 км, Каллисто — 5050 км. Как видно, Ганимед по размерам сравним с Марсом. Некоторые спутники имеют периоды обращения вокруг Юпитера большие, чем период обращения Марса вокруг Солнца. Например, периоды обращения VIII и IX спутников соответственно равны 735 и 758 суткам.

С а т у р н — вторая по величине (после Юпитера) планета солнечной системы. Ее диаметр в 9 раз больше земного, а масса в 95 раз больше земной и равна по расчетам американского астронома Хилла $1/3498$ массы Солнца. Сатурн имеет наименьшую удельную плотность из всех планет солнечной системы, меньше удельной плотности воды, и наибольшую сплюснутость. Его сжатие $\alpha=0,11$. Температура видимой поверхности планеты равна -160°C . Химический состав атмосферы такой же, что и атмосферы Юпитера, лишь с большим процентом метана. Изображения диска планеты, полученные на многих обсерваториях, содержат относительно небольшое число деталей и, по-видимому, все процессы и на поверхности, и в атмосфере происходят более медленно, чем на Юпитере. В систему

Сатурна, кроме девяти спутников, входит знаменитое кольцо, состоящее из множества мелких твердых частиц. Это кольцо само делится на три кольца, из которых среднее обладает наибольшей яркостью. Толщина колец не превышает 15—20 км, в то время как наружный диаметр равен 270 000 км. Общая масса колец невелика и составляет всего одну десятиллионную часть массы планеты.

Наибольший из спутников Сатурна Титан обладает собственной метановой атмосферой.

У р а н, Н е п т у н и П л у т о н — самые отдаленные планеты нашей системы. Масса Урана в 23 000 раз меньше массы Солнца, а масса Нептуна — в 18 800 раз меньше. В настоящее время не существует надежных определений массы Плутона, так как эта планета открыта в 1930 г. и за последние 35 лет она прошла по своей орбите небольшую дугу (всего 50°). Это объясняется тем, что Плутон находится на весьма большом расстоянии от Солнца (в 40 раз дальше Земли) и один оборот вокруг Солнца совершает только за 248 лет.

На поверхности Плутона температура -210°C , на поверхности Урана и Нептуна -180°C . общепринятое значение массы Плутона равно $1/360\,000$ массы Солнца (немного меньше массы Земли), и оно найдено в результате изучения возмущений, которые порождаются притяжением со стороны Плутона в движении Урана и Нептуна. Однако из-за большого расстояния между ними (Уран удален от Солнца на расстояние 19 а. е., а Нептун — на расстояние 30 а. е.) это значение массы получено с большой относительной погрешностью. Уран и Нептун обладают мощными атмосферами, содержащими большое количество метана и аммиака в твердом состоянии. Периоды обращения Урана и Нептуна вокруг Солнца соответственно равны 84 и 165 годам. Ось вращения Урана лежит почти в плоскости орбиты, и хотя период вращения планеты равен всего 10 часам 49 минутам, смена дня и ночи имеет место через многие годы. В 1946 г. ось вращения Урана была направлена в сторону Земли, и в течение последних пятнадцати лет можно было наблюдать лишь одну полярную область планеты. На поверхности планеты не замечены какие-либо контрастные области, если не считать, что имеется сильное потемнение к краю диска.

Вокруг Урана обращается пять спутников, вокруг Нептуна — два. Если спутники Урана однородны по сво-

ним размерам (наименьший из них, Арнэль, имеет диаметр 600 км, а наибольший, Титания,—1600 км), то спутники Нептуна весьма непохожи один на другой. Тритон имеет диаметр 4000 км (больше, чем диаметр Луны) и обращается вокруг планеты за 6 суток, в то время как Нереида имеет диаметр всего 300 км, а период ее обращения почти равен земному году (359 суток).

Малые планеты (астероиды) и кометы составляют особые группы тел солнечной системы. Они малы по массе и размерам и имеют самые причудливые формы. Некоторые из этих тел в прошлом служили пробным камнем для проверки многих методов и теорий небесной механики. В настоящее время открыто около 2000 малых планет, и их орбиты в большинстве случаев располагаются между орбитами Марса и Юпитера. Орбиты ряда астероидов имеют большой наклон к плоскости эклиптики.

Статистические методы исследований позволяют сделать вывод, что общее количество астероидов, диаметр которых превышает 1 км, приблизительно равно 140 000. Наибольшая из малых планет Церера (согласно международному соглашению она в списке малых планет имеет № 1, так как была открыта первой 1 января 1801 г.) имеет диаметр 767 км. В специальной литературе обсуждается вопрос о возможности использования некоторых малых планет в качестве трамплина для далеких межпланетных путешествий.

Кометы — самые удивительные небесные светила. Они видны на небосводе в телескопы (иногда и невооруженным глазом) в виде звезд с «хвостом». Хвосты образуются из твердых частиц и газов ядра кометы под действием солнечного светового давления и потока заряженных частиц, выбрасываемого Солнцем и называемого «солнечным ветром», поэтому они особенно хорошо видны на небольшом расстоянии от Солнца. Многие кометы в своем движении приближаются к Юпитеру и Сатурну, которые порождают большие возмущения элементов орбит комет. Проблема больших возмущений в небесной механике является одной из самых сложных, и в разделе 5 об этом будет рассказано более подробно.

В 1965 г. одна из комет — комета Икея — Секи — прошла на расстоянии всего около 0,5 млн. км от Солнца, после чего она распалась на несколько комет. Некоторые

кометы, у которых скорость превышает так называемую третью космическую скорость, навсегда покидают пределы солнечной системы, поэтому их нельзя считать членами семьи Солнца.

Кроме перечисленных небесных тел, в нашей системе имеется и межпланетная среда (ее плотность составляет 10^{-21} г/см³), однако вопросы ее движения методами небесной механики не рассматриваются.

Г р а н и ц ы с о л н е ч н о й с и с т е м ы. Перед нами часто возникают вопросы: как далеко простирается солнечная система? Имеются ли еще какие-нибудь неизвестные тела в солнечной системе? Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо дать определение границ солнечной системы. Если считать, что солнечная система простирается до таких расстояний, где сила притяжения Солнца становится равной силе притяжения ближайших к нам звезд, то получится огромное число — 200 000 а. е. Вспомним, что самая далекая от Солнца планета Плутон находится на расстоянии всего 40 а. е. Таким образом, огромная часть пространства солнечной системы до настоящего времени как будто не «заселена» небесными телами, но считать такое утверждение окончательным было бы неправильным, так как в будущем, несомненно, создадут более совершенные приборы и методы наблюдений, которые расширят наши представления о реальной солнечной системе. Следует сказать, что после открытия Плутона американским астрономом Томбо было решено продолжить непосредственные поиски трансплутоновых планет при помощи систематического фотографирования участков неба. Томбо совместно со своими сотрудниками исследовал около 90 млн. изображений 30 млн. звезд. Из этих ценных исследований можно сделать вывод, что если и существуют пока неизвестные нам далекие планеты, то их звездная величина *) должна быть больше 16^m, т. е. это должны быть очень слабые небесные светила. Но надо иметь в виду, что объект диаметром 15 000 км, поверхность которого отражала бы так же, как лунная поверхность, и удаленный на расстояние 100 а. е., имел бы звездную величину лишь 18^m.

*) О звездных величинах см. книгу серии «Популярные лекции по астрономии» П. П. Паренаго «В мире звезд», Гостехиздат, 1956.

4. МЕТОДЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

Выше мы говорили о том, что при изучении движения небесных тел приходится иметь дело с весьма сложными уравнениями, в которые в качестве неизвестных входят или координаты небесных тел, или элементы их орбит, и основная задача небесной механики заключается в решении этих уравнений, т. е. в нахождении неизвестных как функций времени. Допустим, что нам удалось найти точное решение задачи о движении планет солнечной системы. Другими словами, допустим, что нам известно, как зависят координаты планет (x, y, z) от времени t , т. е. нам известны функции $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$. В этом случае мы имели бы полную картину взаимных расположений тел солнечной системы в любой момент времени. Задавая произвольный момент времени $t^{(0)}$, мы из точного решения, которое по предположению известно, нашли бы значения координат небесных тел $x(t^{(0)})$, $y(t^{(0)})$, $z(t^{(0)})$. Ради большей ясности поясним высказанные соображения на простейшей задаче.

Задача. Пусть планета P движется вокруг Солнца S по круговой орбите в плоскости эклиптики с постоянной угловой скоростью (*средним суточным движением*) n^0 на расстоянии R от Солнца. Пусть в начальный момент $t=0$ планета P находится на положительном направлении оси абсцисс. Определить положение планеты в пространстве в любой момент времени.

Решение. Так как движение планеты происходит в плоскости эклиптики, то для всех моментов времени координата z тождественно равна нулю. За время t (отсчитываемое в сутках) планета проходит угловое расстояние $u=n^0t$. Тогда из рис. 10 видно, что $x=R\cos(n^0t)$, $y=R\sin(n^0t)$. Таким образом, точное решение задачи выражается равенствами:

$$\begin{aligned}x &= R \cos n^0 t, \\y &= R \sin n^0 t, \\z &= 0.\end{aligned}$$

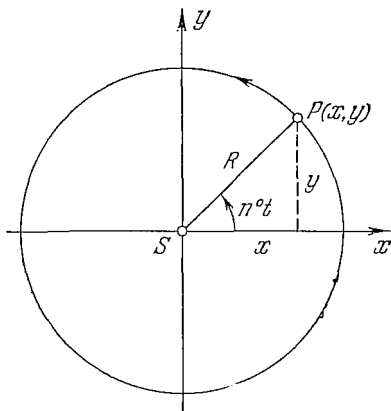


Рис. 10. Движение планеты P по круговой гелиоцентрической орбите.

Полученное решение имеет то преимущество, что оно пригодно для кругового движения планеты с любыми n^0 и R . Если нас интересуют координаты какой-либо конкретной планеты, мы должны знать значения n^0 и R и по выведенным формулам в заданный момент времени t найдем координаты x, y, z . Например, если $n^0=1, R=1$ а. е., то

$$x = \cos t \text{ а. е.},$$

$$y = \sin t \text{ а. е.},$$

$$z = 0.$$

Точное решение этой задачи получено в таком виде, что все данные задачи не принимают какие-нибудь конкретные численные значения. В таком случае астрономы говорят, что решение задач получено в *аналитическом* виде и теория движения планеты P называется *аналитической теорией движения*. Таким образом, в небесной механике *аналитической теорией движения небесных тел* (планет, спутников и др.) называется совокупность формул, выражающих зависимость координат или элементов орбит от времени, в которых характеристики небесных тел (массы, начальные значения координат или элементов и др.) входят в «буквенном» виде, не принимая конкретных значений. Отсюда должно быть ясно, что аналитические теории движения обладают свойством универсальности, ибо они могут быть применены к различным небесным телам, достаточно лишь подставить в полученные формулы конкретные числовые значения характеристик данного небесного тела.

К сожалению, все механические схемы, применяемые в небесной механике, описываются такими уравнениями, что нахождение их точных аналитических решений на настоящем этапе развития математики представляется невозможным.

Но чтобы не было места для пессимизма, мы сразу хотим сообщить, что в настоящее время имеются весьма эффективные п р и б л и ж е н н ы е методы решения задач небесной механики, которые позволяют предсказывать местоположение тел солнечной системы с необходимой для практики точностью на больших промежутках времени.

Все методы небесной механики можно объединить в три группы: группа *аналитических методов*, группа *численных методов* и группа *качественных методов*. Сами теории движения небесных тел в соответствии с примененны-

ми для их построения методами бывают *аналитические* и *численные*. Иногда всю небесную механику делят на три раздела: аналитическую небесную механику, численную небесную механику и качественную небесную механику.

Аналитические методы. В основу большинства аналитических методов положены следующие соображения. Если на тело P действует только сила притяжения со стороны тела S (например, на Землю действует только сила притяжения Солнца), то мы имеем задачу двух тел, решение которой было известно еще Ньютону. Тело P будет двигаться по эллиптической, гиперболической или параболической орбите. Если P притягивается и другими телами, массы которых намного меньше массы тела S , то эллиптическая орбита лишь немного искажается. Это объясняется тем, что силы взаимодействия между малыми массами тоже малы и они не могут вызвать больших ускорений. Такой случай как раз и имеет место в солнечной системе, где массы всех планет намного меньше массы Солнца. Эти малые добавочные силы в небесной механике называются *возмущающими*, а порождаемые ими отклонения от эллиптического движения, как об этом уже говорилось, называются *возмущениями*. Аналогично эллиптическая, гиперболическая или параболическая орбиты, параметры которых в результате действия возмущающих сил изменяются с течением времени, называются *возмущенными орбитами*, а движения по этим орбитам — *возмущенными движениями*. Если изучаются отклонения небесного тела в координатах, то говорят о *возмущениях координат*, если же рассматриваются отклонения от элементов орбиты, то говорят о *возмущениях элементов*.

Заметим, что если создана теория движения какого-либо небесного тела в координатах, то всегда можно найти элементы орбиты и, наоборот, по известным элементам всегда можно определить координаты тела в заданный момент времени, так как существуют достаточно простые формулы, которые позволяют перейти от элементов к координатам и наоборот.

Приведем без вывода некоторые из этих формул. Например, пусть известны элементы эллиптической орбиты ($a, e, i, \Omega, \omega, \tau$) и требуется определить координаты (x, y, z) в некоторый момент времени t .

Эта задача решается следующим образом. Прежде всего определяем среднее суточное движение небесного

тела по формуле

$$n = \frac{\sqrt{l(1+m)}}{a^{\frac{3}{2}}}$$

Далее определяем некоторый вспомогательный угол M , который называется *средней аномалией*:

$$M = n(t - \tau).$$

Зная среднюю аномалию, находим другой вспомогательный угол E (*эксцентрическую аномалию*):

$$E - e \sin E = M.$$

Это уравнение называется *уравнением Кеплера*, и оно послужило началом для огромного количества весьма важных теоретических исследований в небесной механике. Для решения этого уравнения имеются высокоточные таблицы, которыми чаще всего пользуются на практике.

На следующем шаге определяется *истинная аномалия* v , т. е. угол между направлением на перигецентр орбиты и на небесное тело:

$$\operatorname{tg} \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}.$$

Если известна истинная аномалия v , то легко определяется значение гелиоцентрического расстояния тела

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos v}.$$

Наконец, по формулам

$$\begin{aligned} x &= r [\cos(v + \omega) \cos \Omega - \sin(v + \omega) \sin \Omega \cos i], \\ y &= r [\cos(v + \omega) \sin \Omega + \sin(v + \omega) \cos \Omega \cos i], \\ z &= r \sin(v + \omega) \sin i \end{aligned}$$

находим координаты x , y , z .

Таким образом, возмущенные координаты тела или элементы его орбиты могут быть представлены в виде сумм

$$\begin{aligned} x(t) &= x^{(0)}(t) + \Delta x(t), \\ &\dots \dots \dots \\ a(t) &= a_0 + \Delta a(t), \\ e(t) &= e_0 + \Delta e(t), \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

где величины $x^{(0)}(t)$, ..., a_0 , e_0 , ... представляют решение задачи двух тел (или невозмущенные значения координат и элементов), а величины $\Delta x(t)$, ..., $\Delta a(t)$, $\Delta e(t)$, ... — возмущения этих координат и элементов. Последние также являются функциями времени.

Какую орбиту определяют элементы, которые изменяются с течением времени? Чтобы выяснить этот вопрос, допустим сначала, что с течением времени изменяется лишь один элемент — угловое расстояние перигелия ω от линии узлов, а все остальные суть постоянные величины. Это означает, что неизменяющаяся по форме и размерам орбита, плоскость которой неподвижна в пространстве, изменяет свое положение («вращается») на плоскости, так как угол ω изменяется со временем (рис. 11). Допустим теперь, что зависят от времени лишь размеры большой полуоси. В таком случае плоскость орбиты остается неподвижной, направление на перигентр не изменяется, форма орбиты (степень сплюснутости) не изменяется, а ее размеры изменяются с течением времени. Получается «пульсирующий» эллипс, полуоси которого изменяются таким образом, что эксцентриситет остается одним и тем же. Если же все элементы орбиты являются функциями времени, то мы имеем медленно изменяющуюся и по форме, и по размерам орбиту, которая «вращается» в своей плоскости, причем положение плоскости орбиты в пространстве также медленно меняется. Такие медленно изменяющиеся с течением времени элементы орбиты в небесной механике называются *оскулирующими элементами*.

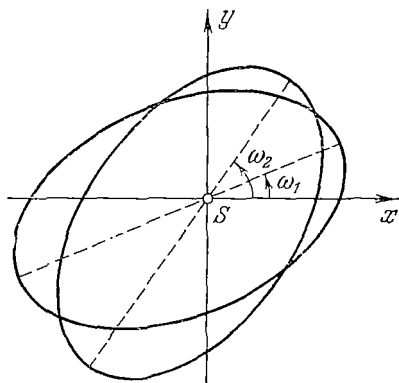


Рис. 11. Вращение эллиптической орбиты с переменным элементом ω .

Основные математические трудности заключаются в нахождении возмущений, и для этого были созданы различные методы.

дические функции времени (члены вида $\cos mt$, $\sin mt$), и, наконец, члены, представляющие произведение времени на периодические функции времени.

Первые возмущения называются *вековыми*, вторые — *периодическими*, третьи — *смешанными*. Коэффициенты при этих возмущениях называются *коэффициентами возмущений*, и цель всех аналитических методов как раз заключается в том, чтобы найти выражения для коэффициентов возмущений. Следует подчеркнуть, что различные возмущения оказывают существенно различное влияние на характер изменения координат небесных тел или элементов их орбит.

Наиболее существенными являются вековые возмущения, ибо даже в том случае, когда их коэффициенты малы, в течение достаточно большого промежутка времени они вызывают большие изменения в координатах и элементах (более конкретные результаты будут рассмотрены в следующем разделе).

После того как создана теория движения конкретного небесного тела, мы снова обращаемся к действительности. Таков единственно правильный путь развития науки, который хорошо характеризуется словами «от практики к теории, а потом от теории снова к практике», ибо наиболее общим критерием истинности теории является практика, понимаемая в самом широком смысле. И, естественно, небесная механика не составляет исключения. В ее общем методе исследования очень четко выделяются указанные этапы. Действительно, исходя из реального строения солнечной системы, мы прежде всего выбираем механическую схему, которая изучается теоретическими методами. Другими словами, на втором этапе строится теория. И далее, качество построенной теории проверяется путем сравнения координат, полученных на основе теории, с реальными наблюдениями.

Поэтому нас всегда интересует следующий вопрос: какова разность между точным решением уравнений небесной механики [например, $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$] и приближенным решением, т. е. каковы разности $x(t) - \bar{x}(t)$, $y(t) - \bar{y}(t)$, $z(t) - \bar{z}(t)$? Если эти разности не превышают точность наблюдений на современных астрономических инструментах за сравнительно большой промежуток времени (порядка столетия или больше), то такую приближенную аналитическую теорию движения небесных тел можно

считать хорошей. Мы хотим, кроме того, заметить, что на практике при рассмотрении движения конкретных небесных тел часто приходится вводить так называемые эмпирические члены (это поправки, которые получают-ся из наблюдений), чтобы сделать разности $x(t) - \bar{x}(t)$, $y(t) - \bar{y}(t)$, $z(t) - \bar{z}(t)$ еще меньшими, и хотя такой прием математически строго не обоснован, он иногда дает хорошие практические результаты.

Резюмируя, мы можем сказать, что в настоящее время в распоряжении астрономов имеются хорошо разработанные аналитические методы, с помощью которых были построены аналитические теории движения больших планет солнечной системы, многих спутников и многих малых тел солнечной системы. Эти теории удовлетворительно представляют реальные движения в нашей системе. Вместе с тем было бы неправильно утверждать, что аналитические методы и аналитические теории получили в настоящее время окончательное завершение. Непрерывный рост наблюдений и увеличение их точности ставят перед нами вопрос о разработке более совершенных аналитических методов с учетом большего числа возмущающих факторов. Это, как мы увидим дальше, особенно важно при создании аналитических теорий движения искусственных небесных тел.

Ч и с л е н н ы е м е т о д ы. Для построения теорий движения конкретных небесных тел наряду с аналитическими методами применяются и численные методы. До появления быстродействующих вычислительных машин численные методы использовались намного реже, чем аналитические методы, и их применение чаще всего ограничивалось вычислением орбит некоторых комет и некоторых малых планет на небольшом промежутке времени. Ограниченная область применения численных методов в прошлом объясняется тем, что в задачах небесной механики приходится выполнять огромное количество арифметических операций (миллиарды операций), а это весьма затруднительно без использования современных вычислительных средств.

Основателем этого направления в небесной механике можно считать английского астронома Адамса (1819—1892), который создал метод, впоследствии названный его именем. Этот метод в настоящее время применяется не только в небесной механике.

В чем сущность применения численных методов в небесной механике? Чтобы в принципе описать эту весьма сложную задачу, мы рассмотрим упрощенную схему. Допустим, что в некоторый момент времени t_0 , который мы будем называть начальным, известны координаты небесного тела $x(t_0)$, $y(t_0)$, $z(t_0)$ (координаты точки A_0) и начальное ускорение ω_0 . Будем считать, что от момента времени t_0 до момента t_1 (следовательно, промежуток времени равен $t_1 - t_0$) ускорение тела постоянно, т. е. тело движется равноускоренно. Тогда, пользуясь хорошо известными формулами равноускоренного движения, можно вычислить значения координат тела в момент времени t_1 , т. е. величины $x(t_1)$, $y(t_1)$, $z(t_1)$. Имея значения координат точки A_1 в момент t_1 (рис.

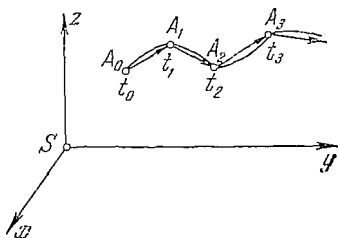


Рис. 12. Схематическое изображение численных методов.

12), можно найти значение силы $F[x(t_1), y(t_1), z(t_1)]$, действующей на тело, когда оно находится в точке A_1 . Далее, если нам известна величина $F[x(t_1), y(t_1), z(t_1)]$, то, пользуясь уравнениями движения, находим значение ускорения тела в момент t_1 , т. е. величину ω_1 .

Теперь рассмотрим момент времени t_2 и предположим, что от момента времени t_1 до t_2 (на промежутке времени $t_2 - t_1$) ускорение тела постоянно и равно величине ω_1 . Тогда с помощью упомянутых выше формул вычисляем координаты тела в момент времени t_2 (координаты точки A_2), т. е. находим величины $x(t_2)$, $y(t_2)$, $z(t_2)$. Последние дают возможность определить величину силы в момент t_2 . Далее применяется та же схема вычислений. Таким образом, численные методы позволяют определить координаты тела в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 , ... Промежутки времени $t_1 - t_0$, $t_2 - t_1$, ... называются *шагом* численного метода. Если мы задаем моменты времени t_1 , t_2 , t_3 , ... так, чтобы промежутки $t_1 - t_0$, $t_2 - t_1$, $t_3 - t_2$, ... были равными между собой, то говорят, что вычисления ведутся с *постоянным шагом*. В противном случае говорят, что вычисления ведутся с *переменным шагом*.

Основной недостаток всех численных методов — это допущение, что на каждом шаге ускорение не изменяется.

В действительности же ускорение не непрерывно изменяется, так как на любое небесное тело силы притяжения действуют непрерывно. В какой-то степени этот недостаток компенсируется тем, что шаг вычислений можно

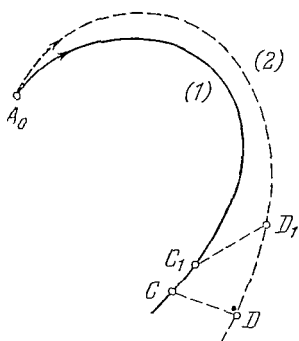


Рис. 13. Изображение точного (1) и приближенного (2) решений уравнений небесной механики.

выбрать достаточно малым, но в таком случае намного увеличивается объем вычислений. Кроме того, увеличение числа шагов приводит к увеличению общей ошибки вычислений. Чтобы пояснить это утверждение, рассмотрим рис. 13.

Пусть кривая (1) изображает точное решение задачи, а кривая (2) — решение задачи, полученное численными методами, причем допустим, что в процессе вычислений было

сделано N шагов. Американский астроном Брауэр показал, что расстояние между кривыми может достигать величины, пропорциональной корню квадратному из числа шагов, т. е. $DC = k\sqrt{N}$, где k — некоторый коэффициент пропорциональности. Но положение точки на самой орбите тоже определяется с некоторой ошибкой, поэтому ошибка в ее положении еще больше. Оказывается, что разность координат точки на кривых (1) и (2) в один и тот же момент времени равна $D_1C_1 = k_1\sqrt{N^3}$, где k_1 — коэффициент пропорциональности. Для того чтобы обеспечить необходимую точность, практические вычисления выполняются с большим количеством значащих цифр.

Поскольку, с одной стороны, уменьшение шага погашает точность вычислений, а увеличение количества шагов, наоборот, увеличивает погрешности вычислений, то вполне уместен следующий вопрос: какой шаг вычислений наилучший? Общего ответа на такой вопрос не существует, ибо все зависит от поставленной задачи, от заданной точности и от промежутка времени, на котором ведутся вычисления. Например, при вычислении орбит искусственных спутников иногда приходится брать шаг вычислений, равный всего нескольким секундам, а при вычисле-

нии орбит больших планет можно взять шаг, равный 20 или 40 суткам. Американские астрономы Брауэр, Клеменс и Эккерт вычислили положения пяти планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон) в промежутке времени от 1653 до 2060 г., используя для этого 40-суточный шаг. Электронные вычислительные машины выполнили в процессе вычислений 5 млн. умножений и делений, 7 млн. сложений и вычитаний чисел, имеющих, как правило, четырнадцать разрядов. Выполнение такого количества вычислений раньше было практически невозможно. Для сравнения скажем, что одному идеальному, не ошибающемуся вычислителю, работающему без перерыва, потребовалось бы для выполнения такого объема вычислений 110 лет.

Другой недостаток численных методов заключается в том, что при вычислении положения небесного тела в какой-нибудь момент времени необходимо сначала вычислить его координаты во все промежуточные моменты времени. Заметим, что аналитические методы в этом пункте выгодно отличаются от численных методов, так как для вычисления положения тела с помощью аналитических методов не требуется знания положений небесных тел в промежуточные моменты времени.

К а ч е с т в е н н ы е м е т о д ы. Описанные выше методы изучения движения небесных тел характеризуются прежде всего тем, что они находят в той или иной форме решение уравнений небесной механики. В отличие от них качественные методы, созданные в конце прошлого и в начале этого века гениальными учеными Ляпуновым и Пуанкаре, позволяют найти те или иные свойства решений без нахождения самих решений. Однако при решении некоторых качественных проблем небесной механики иногда используются аналитические или численные методы. Очень трудно описать сами качественные методы небесной механики, так как они принадлежат к весьма сложным разделам современной высшей математики. Конечно, качественные методы не могут ответить на вопрос, каковы координаты той или иной планеты в данный момент времени, да они и не для этого разработаны. Качественные методы применяются в тех случаях, когда надо изучить общие свойства движений небесных тел, эволюцию солнечной системы в целом на весьма больших промежутках времени (порядка миллионов и миллиардов лет).

Они должны ответить на вопросы: как выглядела наша система много миллионов лет назад, не распадется ли она через обозримый для человечества промежуток времени (так называемая проблема устойчивости солнечной системы), как будут изменяться спутниковые системы (Юпитер со своими спутниками, Сатурн, Уран и др.), что можно сказать о вращательном движении планет и спутников на больших промежутках времени? Каким было движение Луны миллион лет назад и каким оно будет миллион лет спустя — таков еще один из важнейших вопросов качественной небесной механики. Эта проблема имеет не только огромное теоретическое, но и не менее важное практическое значение.

Выше мы говорили, что возмущения координат или элементов орбиты небесного тела имеют различную структуру. Один из труднейших вопросов качественной небесной механики, который в настоящее время до конца не решен, может быть сформулирован таким образом: действительно ли существуют вековые возмущения элементов орбит или же они являются следствием несовершенства математических методов, которые применяются нами при построении аналитических теорий движения небесных тел? Ответ на этот вопрос самым тесным образом связан с так называемой проблемой устойчивости солнечной системы, которая более подробно изложена в разделе 5.

Изучение общих свойств движений в солнечной системе может существенно помочь в решении проблемы происхождения планет, спутников, малых планет и других тел солнечной системы.

Еще в древности было известно, что движения тел солнечной системы обладают некоторой периодичностью, т. е. повторяемостью взаимных расположений, и весьма важно было ответить на такой вопрос: имеют ли уравнения небесной механики среди всевозможных решений, которые нам неизвестны, периодические решения? Положительный ответ на этот вопрос мы находим в замечательных работах А. Пуанкаре и А. М. Ляпунова.

Существенный вклад в развитие качественной небесной механики внесли современные ученые (немецкий математик К. Зигель, советские математики А. Н. Колмогоров и В. И. Арнольд и американский математик Ю. Мозер), которые создали новые методы, успешно применяемые и в небесной механике. В частности, А. Н. Колмогоров и

В. И. Арнольд доказали, что уравнения небесной механики допускают так называемые условно-периодические решения — решения не периодические, но близкие к ним.

5. КОНКРЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

Теории движения больших планет. Благодаря гениальному открытию Ньютона и замечательным работам крупнейших ученых XVIII в. к концу столетия были выведены основные уравнения движения тел солнечной системы. Наряду с этим астрономы-наблюдатели накопили огромное количество наблюдений больших планет, спутников, поэтому практика все более настойчиво ставила вопрос о создании такой теории движения планет, которая хорошо согласовывалась бы с наблюдениями. К этому времени астрономы научились наблюдать большие планеты с большой точностью, чему в немалой степени способствовали прекрасные инструменты В. Гершеля. Таким образом, к началу XIX в. в небесной механике имелись все необходимые предпосылки для конкретного построения аналитических теорий движения больших планет, известных в то время. Можно без преувеличения сказать, что в XIX в. достигла наибольшего расцвета *аналитическая* небесная механика, хотя и другие ее направления тоже непрерывно развивались.

Выше было сказано, что, пользуясь уравнениями небесной механики, решают две основные задачи:

1) задачу об определении координат или элементов орбиты небесных тел, если известны силы взаимного притяжения;

2) задачу о нахождении действующих сил, если известно само движение небесных тел.

В настоящее время мы умеем находить лишь приближенное решение первой задачи, но оно оказывается достаточным, чтобы предсказывать положения планет солнечной системы. Все аналитические теории движения больших планет создавались на основе использования той механической схемы, которая была названа в разделе 1 «задачей n тел». Другими словами, все планеты считаются материальными точками с массами, равными массам реальных планет. Чтобы стало возможным определение возмущений $\Delta x(t)$, ... в аналитическом виде, необходимо правые части

уравнений движения (т. е. функцию $F[x(t), y(t), z(t)]$) представить в виде определенной формулы. Представление функции F в виде определенного выражения (так называемая задача «о разложении возмущающей функции в ряд») является очень сложной задачей и она была решена весьма подробно в трудах Леверье. Он со своими коллегами, со-трудниками Парижской обсерватории, работал над решением этой задачи на протяжении многих лет и получил в этой формуле первые 105 членов (заметим, что всего членов будет бесчисленное множество), причем, если расписать подробно полученную формулу, получится книга в 200 страниц. Далее, имея выражение для правых частей уравнений, Леверье, Ньюкомб и Хилл определили возмущения элементов орбит больших планет, т. е. нашли выражения для коэффициентов возмущений.

Например, в теории движения Венеры, Земли и Юпитера, построенной Леверье, эксцентриситеты их орбит выражаются следующими формулами:

$$e = 0,00681636 - 0,00005384t + 0,000000126t^2 \quad (\text{Венера}),$$

$$e = 0,0167498 - 0,0000426t - 0,000000137t^2 \quad (\text{Земля}),$$

$$e = 0,04833475 + 0,000164180t - 0,000000468t^2 \quad (\text{Юпитер})$$

(в этих формулах не приведены смешанные и периодические возмущения эксцентриситета, так как для больших промежутков времени они представляют меньший интерес, чем вековые). В уравнениях Леверье время t отсчитывается в столетиях, начиная с 1900 г. Приведенные формулы показывают, что за один год эксцентриситеты орбит этих планет изменяются очень мало (на 0,00000004; 0,000000054; 0,00000164 соответственно), однако если рассмотреть большие промежутки времени (порядка десятков тысяч лет), вековые возмущения могут привести к существенным изменениям орбит планет. Для примера укажем, что эксцентриситет орбиты Земли, вычисленный по формуле, через 23 300 лет (230 столетий) становится отрицательным, но этого не может быть, так как эксцентриситет любой орбиты по определению или равен нулю, или положителен. Уже этот пример показывает, что все аналитические теории могут достаточно точно представлять действительные движения планет лишь в течение определенного промежутка времени, за пределами которого они непригодны.

Как определить этот промежуток времени? К сожалению, в настоящее время мы не располагаем ответом на поставленный вопрос и лишь в некоторых частных случаях можно указать теоретически тот промежуток времени, на котором приближенная теория и точное решение задачи достаточно мало отличаются одно от другого. Поэтому основным критерием качества построенной аналитической теории является «практика», которая в небесной механике, как мы уже говорили, имеет вполне конкретное содержание: наблюдения и сравнение результатов теории с наблюдениями. При сравнении теорий движения больших планет с наблюдениями, сделанными после 1800 г. до наших дней, обнаруживаются расхождения, достигающие нескольких секунд дуги. Отсюда можно сделать вывод, что на протяжении одного-двух столетий движения планет будут происходить в соответствии с формулами Леверье, Ньюкомба и Хилла, но пригодны ли эти теории для больших промежутков времени — нам неизвестно.

Свои результаты Леверье, Ньюкомб и Хилл издали в виде больших таблиц, которые содержат как общие выражения для коэффициентов возмущений, так и численные значения этих коэффициентов для различных планет. На основании этих таблиц составляются астрономические ежегодники, которые содержат местоположения планет и спутников на данный год.

В уравнения небесной механики входят массы планет, поэтому вместе с построением аналитических теорий определялись и значения масс. Чем точнее построена теория движения, тем точнее можно определить массу планеты. Действительно, хорошие аналитические теории движения позволяют определять весьма точно периоды обращения планет вокруг Солнца, а далее, пользуясь уточненным третьим законом Кеплера, находить более точные значения масс.

Хотя научное значение и практическую ценность фундаментальных работ Леверье, Ньюкомба и Хилла трудно переоценить, уточнение аналитических теорий движения продолжается до настоящего времени. В США Клеменс строит новую теорию движения Марса, более точную, чем теория Ньюкомба. Это вызвано тем, что возмущения элементов его орбиты становятся достаточно большими из-за притяжения со стороны Юпитера и Сатурна и из-за

большого значения эксцентриситета невозмущенной орбиты (Марс движется по орбите с самым большим эксцентриситетом). В СССР советский астроном Ш. Г. Шараф закончила построение теории движения Плутона.

Открытие Нептуна — одно из самых замечательных достижений не только небесной механики, но и всех естественных наук. После открытия Гершелем в 1781 г. Урана русский астроном А. И. Лексель вычислил его предварительную орбиту, которая оказалась круговой с радиусом, примерно в 2 раза большим расстояния Сатурна от Солнца. Однако более точное теоретическое исследование движения Урана на основании закона всемирного тяготения натолкнулось на необъяснимые трудности. Исследования показали, что учет притяжения Урана со стороны известных больших планет (Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и Сатурн) не объясняет его истинного движения и расхождения между положением, вычисленным с помощью теории, и действительным положением в пространстве достигали заметной величины. Так, в 1830 г. эти расхождения составили $20''$, в 1840 г. — $1', 5$, а в 1844 г. — уже около $2'$. Получился парадокс: Уран в своем движении вокруг Солнца как будто не подчиняется точно закону притяжения Ньютона. Но к этому времени уже мало кто допускал мысль, что закон всемирного притяжения Ньютона несправедлив. Поэтому была выдвинута гипотеза, что движение Урана «возмущается» не только силами притяжения известных в то время планет, но и неизвестной планетой, а расхождения в положении Урана, которые приводились выше, следует отнести за счет притяжения со стороны неизвестной планеты.

Разыскать неизвестную планету путем наблюдений было очень трудно. Для этого необходимо было организовать наблюдения всех участков неба, и при этом ни у кого не было уверенности, что яркость планеты такова, что она может быть обнаружена с помощью телескопов того времени. Поэтому астрономы ясно себе представляли, что для нахождения неизвестной планеты необходимо определить ее орбиту по тем предполагаемым возмущениям, которые она производит в движении Урана. Эта задача могла быть решена, если бы была создана аналитическая теория движения Урана, в которой учитывались бы и возмущения со стороны известных планет и со стороны предполагаемой («гипотетической») планеты. Такая сложная аналитичес-

кая теория, представляющая огромные математические трудности (эти трудности вызывались учетом возмущений со стороны многих планет и малостью возмущений от предполагаемой планеты), была построена почти одновременно Леверье (в 1843—1845 гг.) и английским астрономом Адамсом (в 1845—1846 гг.). Они определили элементы орбиты неизвестной планеты и с их помощью стало возможным определить ее видимый путь на небосводе и видимые ее положения в различные моменты времени. Леверье вычислил приближенные значения координат гипотетической планеты и сообщил их астроному Берлинской обсерватории Галле с просьбой поискать ее на небосводе. 23 сентября 1846 г. Галле обнаружил планету на расстоянии лишь около 1° от места, предсказанного Леверье. Впоследствии она была названа Нептуном.

Открытие Нептуна было новым убедительнейшим доказательством справедливости закона всемирного притяжения.

Т е о р и я д в и ж е н и я Л у н ы. Создание точной теории движения Луны представляет собой одну из самых сложных задач небесной механики. Это объясняется следующими обстоятельствами:

1. Так как Луна находится на весьма малом с точки зрения масштабов солнечной системы расстоянии от Земли (384 000 км), ее небольшим линейным перемещениям в пространстве соответствуют заметные угловые перемещения. Легко вычислить, что отрезку длиной в 1 км на расстоянии Луны соответствует $0'',5$. Поэтому, если учесть, что геоцентрическая скорость Луны равна 1 км/сек, то отсюда следует, что для создания таблиц солнечного затмения с точностью до 1 сек необходимо знать положение Луны с точностью до $0'',5$. Из этих фактов вытекает, что удовлетворительная теория движения Луны должна определять ее положения в пространстве с точностью до 1—2 км.

2. Расстояние от Луны до Солнца невелико, а это вызывает большие возмущения в движении Луны со стороны Солнца. Заметим, что возмущающая сила Солнца равна разности сил притяжения Солнцем Земли и Луны. Эта разность появляется за счет периодического движения Луны вокруг Земли, т. е. за счет периодического сближения и удаления Луны от Солнца по сравнению с Землей. Расчеты показывают, что возмущающая сила Солнца только в 89 раз меньше основной силы, действующей на Луну,

— силы притяжения Землей. Она изменяет видимое положение Луны за трое суток на 4". Это — огромные возмущения, если сравнить их с другими. Например, возмущения в движении Сатурна, обусловленные притяжением Юпитера, достигают такой величины лишь за 4 года.

3. При построении теории движения Луны Землю уже нельзя считать материальной точкой, так как форма Земли (ее сжатие) также порождает заметные возмущения. Учет сжатия Земли делает уравнения движения Луны еще более сложными.

Таким образом, задача о построении теории движения Луны сложна, с одной стороны, потому, что Луна испытывает большие возмущения различного происхождения (возмущения со стороны Солнца и планет, возмущения от формы Земли), а с другой стороны, сами возмущения приходится вычислять с очень большой точностью.

Было бы неправильно думать, что ценность теории движения Луны заключается лишь в предсказании затмений. Положение кораблей на море определялось при помощи таблиц местоположений Луны. Кроме того, теория движения Луны используется для изучения вращательного движения Земли вокруг собственной оси. Все приложения теории движения Луны даже трудно перечислить.

Построением теории движения Луны занимались многие выдающиеся астрономы и математики. В середине XVIII в. было опубликовано несколько мемуаров знаменитого математика, механика и астронома, члена Петербургской академии наук Эйлера, крупнейших французских математиков Клеро и Даламбера, в которых излагалась теория движения Луны. Намного позже Лаплас также издал свою теорию движения Луны. В 1824—1828 гг. французский ученый Дамуазо усовершенствовал теорию Лапласа и составил новые таблицы ее местоположений. Таблицы Дамуазо были во всеобщем употреблении до 1857 г. Существенный вклад в теорию движения Луны внес немецкий астроном Ганзен, который опубликовал свои таблицы в 1857 г. Они довольно длительное время использовались при составлении астрономических ежегодников.

В основе перечисленных теорий движения Луны в качестве невозмущенной орбиты фигурирует решение задачи двух тел, т. е. невозмущенный эллипс.

Дальнейшее развитие теории движения Луны связано с именем американского математика и астронома Хилла. Хилл с помощью новых математических методов создал весьма совершенную высокоточную теорию движения Луны. В отличие от предыдущих исследователей он отказался от невозмущенного эллипса и в качестве основной кривой взял некоторое периодическое решение уравнений движения Луны. На основании исследований Хилла американский астроном Браун (1866—1938) опубликовал в 1919 г. таблицы движения Луны, которые применяются в астрономических ежегодниках до настоящего времени. В теории Хилла — Брауна некоторые формулы содержат сотни членов и они обеспечивают вычисление местоположений Луны для различных моментов времени с точностью до секунды дуги.

Теории движения спутников планет. Спутниковые системы сравнимы с солнечной системой в миниатюре, поэтому методы и теории движения, разработанные для планет, в большинстве случаев могут быть использованы для изучения спутниковых орбит. Для некоторых спутников (всего спутников 31) эллиптическая орбита с постоянными элементами удовлетворительно представляет реальное движение на многих оборотах, но иногда приходится учитывать много возмущающих факторов, что существенно усложняет теорию (такое обстоятельство имеет место, как нам уже известно, в теории движения Луны; изучение движения VIII спутника Юпитера представляет собой задачу аналогичной трудности). Вместе с тем теории движения спутников несколько отличаются от теорий движения планет. Расстояния между планетами настолько велики по сравнению с их размерами, что при построении теорий их движения планеты считаются материальными точками. Движение многих спутников происходит вблизи планет, поэтому мы не можем считать планеты материальными точками. Все возмущающие факторы можно было бы разделить на четыре группы:

- 1) возмущения, связанные с формой центральной планеты (возмущения от сжатия);
- 2) возмущения со стороны Солнца;
- 3) возмущения со стороны других спутников той же планеты;
- 4) возмущения со стороны других планет.

В настоящее время возмущения со стороны планет учитываются только в теории движения Луны по той причине, что для других спутников они намного меньше погрешности современных методов наблюдений.

Из перечисленных возмущений наиболее часто приходится учитывать возмущения, связанные со сжатием центральной планеты, и возмущения от Солнца, но для некоторых спутников больших величин достигают возмущения от других спутников. Например, в системе Сатурна Титан заметно возмущает движения более близких спутников (Мимас, Энцелад, Тефия, Диона, Рея). В системе Юпитера галилеевы спутники (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто) благодаря их большим массам тоже оказывают заметные возмущения друг на друга.

Построение теорий движения спутников началось со времени Галилея и продолжается непрерывно до наших дней.

Теории движения малых планет и комет. Мы уже указывали, что в настоящее время известно и зарегистрировано в специальных астрономических изданиях около 1600 астероидов. Зарегистрированными считаются только те малые планеты, для которых определены, хотя и приближенно, элементы орбиты. Однако открытых, но не зарегистрированных астероидов значительно больше, причем наблюдения и определение орбит астероидов продолжаются непрерывно на многих обсерваториях мира. Те малые планеты, орбиты которых становятся известными, включаются в специальный сборник «Эфемериды малых планет», издаваемый Институтом теоретической астрономии АН СССР по решению Международного астрономического союза.

После открытия новой малой планеты астрономы прежде всего определяют ее невозмущенную эллиптическую орбиту. Для того чтобы определить шесть элементов эллиптической орбиты, необходимо иметь не меньше трех наблюдений, отделенных одно от другого промежутком времени в несколько суток.

Однако иногда бывает, что по тем или иным причинам (плохая погода, большая потеря яркости и др.) малая планета «теряется» и определить ее орбиту становится невозможным. Так с 1911 по 1930 г. были открыты 1962 малые планеты, но орбиты были определены только для 484 и только они попали в «Эфемериды малых планет».

Определение невозмущенной орбиты по трем наблюдениям представляет собой сложную задачу, удобное решение которой нашел Гаусс. Ее сложность заключается в том, что астрономические наблюдения дают нам только угловые координаты небесного тела, но не дают величину расстояния от места наблюдения до небесного тела. Если к тому же учесть, что место наблюдения само перемещается в пространстве вследствие движения Земли вокруг Солнца и вследствие ее вращения вокруг оси, то отсюда должно быть ясно, что определение элементов орбиты действительно является весьма сложной задачей.

Теория движения астероидов не ограничивается лишь определением невозмущенных орбит. При построении более точных теорий чаще всего используется схема «ограниченной задачи трех тел», так как движение астероида больше всего «возмущается» притяжением Юпитера, а астероиды благодаря малым массам не оказывают никакого влияния на движение Юпитера. Для некоторых малых планет построены аналитические теории возмущенного движения. Особенно ценными являются теории движения таких малых планет, которые иногда приближаются к Земле и к другим большим планетам, а следовательно, испытывают со стороны последних заметные возмущения (чаще всего приходится учитывать возмущения от Юпитера и Сатурна). По этим возмущениям можно определить более точно значения масс возмущающих планет. Естественно, что больше всего разрабатывалась теория движения малой планеты № 1, Цереры, так как она была открыта раньше всех, имеет самые большие размеры (диаметр равен 767 км) и наибольшую яркость среди всех известных малых планет. Аналитические теории движения Цереры позволяют вычислить ее местоположение на небе с точностью до 1'. В наши дни для вычисления возмущений в движении малых планет широко применяются и численные методы.

Кроме работ по исследованию движения конкретных малых планет, многие астрономы занимались изучением «кольца астероидов» в целом. Оказывается, что распределение астероидов в пространстве далеко не равномерно. На некоторых расстояниях от Солнца имеются резкие сгущения орбит малых планет, в то время как на других расстояниях орбит очень мало, а иногда и вовсе их нет. Наибольшее скопление малых планет наблюдается на расстоянии 3; 3,1 и 4 а. е. от Солнца. Ценные результаты получил

в 20-х годах нашего столетия японский астроном Хирая-ма, который изучал влияние притяжения Юпитера на распределение астероидов внутри кольца, но, к сожалению, не установлен тот промежуток времени, на котором его теория пригодна.

Выяснение причин неравномерного распределения малых планет в пространстве представляет собой весьма сложную и важную задачу, так как ее решение самым тесным образом связано с проблемой эволюции всей солнечной системы.

При определении орбит комет, проходящих недалеко от больших планет (чаще всего они приближаются к Юпитеру и Сатурну), как правило, применялись численные методы. Это объясняется тем, что в небесной механике пока не создана аналитическая теория б о л ь ш и х в о з м у щ е н и й, а здесь мы имеем дело именно с большими возмущениями. Для большей наглядности рассмотрим пример: определим, во сколько раз возмущающее ускорение в движении кометы, проходящей на расстоянии 20 млн. км от Юпитера (обусловленное притяжением со стороны этой планеты), больше возмущающего ускорения в движении Марса (также обусловленного притяжением Юпитера).

Так как наименьшее расстояние Марса от Юпитера равно 550 млн. км, то отношение ускорений кометы и Марса соответственно равно $\left(\frac{550}{20}\right)^2$ или 756. Таким об-

разом, Юпитер «возмущает» движение такой гипотетической кометы в 756 раз сильнее, чем движение Марса. Такие большие возмущения со стороны Юпитера могут очень сильно изменить орбиту кометы.

В р а щ а т е л ь н о е д в и ж е н и е н е б е с н ы х т е л. Выше мы рассматривали движение планет, астероидов, комет вокруг Солнца, движение спутников вокруг планет, т. е. мы рассматривали поступательные движения небесных тел. Однако все небесные тела обладают также и вращательным движением относительно собственного центра тяжести. Из наблюдений достаточно точно определены периоды вращения планет (за исключением Венеры, Плутона) и спутников планет. Наблюдения показывают, что планеты вращаются таким образом, что их оси вращения сохраняют постоянное направление в пространстве. Относительно долго сохраняются, по-видимому, и величины их периодов вращения.

Однако вращательное движение Земли должно быть изучено намного более тщательно и полно, чем вращательные движения других небесных тел, ибо точные измерения «суток» совершенно необходимы в любой сфере человеческой деятельности. Теоретические исследования показали, что в результате притяжения со стороны Луны и Солнца (влияние других планет на вращательное движение Земли в десятки и сотни раз меньше) ось вращения Земли не остается неподвижной в пространстве, а совершает очень сложное движение.

Ось вращения очень медленно описывает конус (рис. 14), сохраняя постоянно один и тот же угол наклона ($66^{\circ},5$)

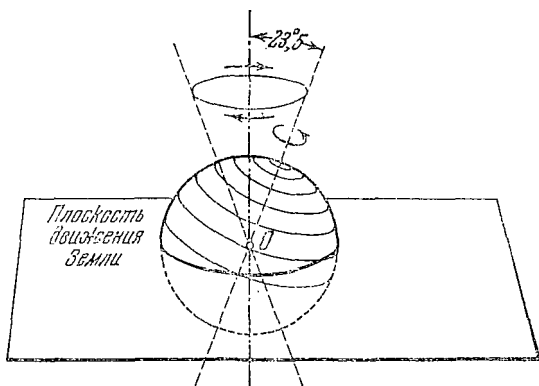


Рис. 14. Прецессионное движение земной оси.

к плоскости эклиптики (или угол $23^{\circ},5$ с перпендикуляром к плоскости эклиптики). Это — так называемое *прецессионное движение* оси вращения. Период прецессионного движения равен 26 000 лет. Таким образом, за 26 000 лет ось вращения Земли делает один оборот, а отсюда вытекает, что за один год она перемещается примерно на $50''$. Кроме такого движения, ось вращения Земли совершает и различные мелкие колебания около среднего положения, определяемого прецессией. Это — так называемые *нутационные колебания*, период которых равен 19 годам. Наибольшая амплитуда этих колебаний достигает $9''$. Прецессионное движение оси вращения Земли было открыто 2000 лет назад древнегреческим астрономом Гиппархом, однако причины, вызывающие такое движение,

были найдены только в начале XVIII в. Ньютоном. Ньютон также предсказал существование нутационных колебаний, которые были обнаружены из наблюдений только в середине XVIII в.

В небесной механике изучался и следующий вопрос: влияют ли силы, порождающие прецессионное и нутационное движения оси вращения Земли, на изменение продолжительности суток. Исследования показали, что они не могут вызвать постоянного изменения продолжительности суток в одном направлении. Но в действительности скорость вращения Земли постепенно уменьшается, т. е. земные сутки постепенно увеличиваются, примерно на 0,001 секунды в столетие. Это явление объясняется действием приливов и отливов, которые также вызываются притяжением со стороны Луны и Солнца. Приливная волна играет роль тормозящей силы, замедляющей вращательное движение Земли. Иными словами, если бы наша планета была абсолютно твердым телом, то притяжение со стороны Луны и Солнца вызывало бы только прецессию и нутацию оси вращения Земли, но не увеличивало бы продолжительность земных суток.

Вместе с тем следует сказать, что у нас слишком мало данных, чтобы можно было утверждать, что таким образом будут изменяться сутки и много миллионов лет спустя. Действительно, сутки станут «длиннее» на 1 час через 360 млн. лет. Сейчас трудно сказать, какими будут водные запасы через сотни миллионов лет.

Результаты качественной небесной механики. До сих пор мы рассматривали лишь такие исследования небесной механики, которые охватывают небольшие промежутки времени (порядка сотен лет). В основу всех этих исследований положены аналитические и численные методы небесной механики. Несомненно, эти методы нуждаются в постоянном совершенствовании, ибо наблюдательная астрономия все время ставит перед небесной механикой вопрос об улучшении имеющихся теорий движения небесных тел. На основании имеющихся аналитических и численных теорий планет, их спутников, малых планет и комет мы в состоянии описать достаточно точно, каким было движение этих небесных тел десятки или даже несколько сотен лет назад и как будут происходить эти движения примерно через столько же лет в будущем. Однако аналитические и численные методы ока-

зываются непригодными, если мы рассматриваем вопрос о происхождении и развитии солнечной системы, т. е. если мы рассматриваем движения в солнечной системе миллионы и миллиарды лет назад (известно, что возраст Земли насчитывает несколько миллиардов лет). Не менее важно исследовать те изменения, которые могут произойти в движении тел солнечной системы через миллионы или миллиарды лет.

Подобные задачи, как мы уже говорили выше, изучаются с помощью качественных методов и они составляют качественную небесную механику.

Трудно сказать, когда была опубликована первая работа по качественным проблемам небесной механики, так как уже у Ньютона мы встречаем те или иные рассуждения, которые могли бы быть отнесены к качественной небесной механике.

Пожалуй, было бы правильно считать, что качественная небесная механика начинается с работ выдающихся французских ученых Лапласа и Лагранжа.

В разделе 4 мы говорили, что возмущения элементов орбиты состоят из вековых, смешанных и периодических членов, и, очевидно, весьма важным является следующий вопрос: содержат ли большие полуоси орбит вековые возмущения?

Нам хорошо известно, что если солнечная система состояла бы только из двух тел (Солнца и одной планеты), то на математическом языке мы имели бы задачу *д в у х* тел, решение которой легко находится. Большая полуось невозмущенного эллипса постоянна, так что она не содержит не только вековых, но и смешанных и даже периодических членов.

Однако если наша система состояла бы из Солнца и двух планет, то мы имели бы задачу *т р е х* тел, точное решение которых нам в настоящее время неизвестно.

Допустим на миг, что большие полуоси орбит планет в задаче трех тел действительно обладают вековыми возмущениями.

Тогда, какими бы малыми ни были коэффициенты возмущений, очевидно, что если время t возрастает неограниченно, большие полуоси также будут все время постепенно расти или уменьшаться. Конечно, более быстрое или более медленное изменение больших полуосей зависит от значений коэффициентов возмущений. Но что стало бы с

нашей системой, если бы действительно такие вековые возмущения существовали? Это привело бы, например, к тому, что через многие миллионы, а может быть и миллиарды лет, большие полуоси планетных орбит стали бы очень большими, планеты удалились бы друг от друга на большие расстояния и солнечная система, в конце концов, распалась бы.

Таким образом, если т о ч н о е решение задачи трех или более тел действительно содержало бы вековые возмущения, то спустя большой промежуток времени произошел бы распад солнечной системы. Однако нам неизвестно, какой вид имеет точное решение задачи, а известен лишь вид п р и б л и ж е н н о г о решения, которое действительно содержит вековые члены. Но в таком случае уместен вопрос, появляются ли в с е в о з м о ж н ы е вековые члены в больших полуосях орбит планет при нахождении приближенного решения?

Оказывается, нет. Лаплас, пользуясь уравнениями небесной механики, написанными Лагранжем, доказал, что большие полуоси планетных орбит (не только в задаче трех тел, но и большего числа тел) не содержат вековых членов, пропорциональных t , т. е. он доказал, что коэффициент при t равен нулю. Позже, в 1809 г., французский математик Пуассон доказал, что коэффициент при t^2 также равен нулю. В 70-х годах прошлого столетия было показано, что коэффициент при t^3 не равен нулю, но он настолько мал, что величина, пропорциональная t^3 , становится заметной через такой большой промежуток времени, на котором аналитические теории заведомо непригодны, поэтому в строгой постановке вопрос о существовании вековых возмущений полностью не решен.

Проблема существования вековых и в некоторой степени смешанных возмущений является частью более общей проблемы качественной небесной механики — проблемы устойчивости солнечной системы, которая может быть сформулирована следующим образом: будут ли всегда все планеты двигаться почти по круговым орбитам (по эллиптическим орбитам с малым эксцентриситетом), почти в одной плоскости (в плоскости эклиптики) и располагаться всегда почти на том же среднем расстоянии от Солнца, что и сейчас; будут ли всегда планеты вращаться вокруг собственных осей вращения так, как сейчас; будут ли спутниковые системы всегда иметь такой вид, что и в настоящее

время; наконец, будет ли всегда кольцо малых планет иметь такую же структуру, что и в настоящее время.

Это — основные аспекты одной из самых сложных проблем небесной механики, полным решением которой в настоящее время мы не владеем. Результаты современных математиков (и прежде всего А. Н. Колмогорова и В. И. Арнольда) говорят о том, что в теоретической задаче трех и более тел, где учитываются только взаимные притяжения, с большой достоверностью (с вероятностью, близкой к единице) можно утверждать, что изменения больших полуосей орбит имеют колебательный характер, т. е. вековых возмущений нет. Однако для того чтобы эти замечательные результаты могли быть применены к нашей реальной солнечной системе, требуются дополнительные исследования.

Другой интересной проблемой качественной небесной механики является так называемая *проблема захвата и обмена*. Сущность ее заключается в следующем. Предположим, что два тела под действием сил взаимного притяжения движутся по эллиптическим орбитам вокруг общего центра тяжести (задача двух тел) и к этой системе приближается третье тело. Как будут происходить движения всех трех тел после наибольшего взаимного приближения? Удастся ли третье тело после близкого прохождения снова на сколь угодно большое расстояние от системы двух тел или оно в будущем всегда будет двигаться на конечном расстоянии от общего центра тяжести (другими словами, произойдет ли *захват* системой, состоящей из двух тел, третьего тела)? Наконец, может быть, одно из двух тел, которые до близкого прохождения третьего тела находились одно от другого на конечном расстоянии, удалится на сколь угодно большое расстояние, а его место займет третье тело, пришедшее «издалека» (т. е. произойдет *обмен* в задаче трех тел). Исследования этой задачи были начаты французским математиком Шази. Существенные результаты были получены также советскими учеными К. А. Ситниковым, Г. А. Мерманом и В. М. Алексеевым. Они доказали, что при некоторых значениях скоростей и координат всех трех тел возможен как захват, так и обмен, и привели конкретные примеры.

Проблема захвата и обмена в задаче трех тел (аналогичную задачу можно сформулировать и для задачи четырех, пяти и т. д. тел) интересна не только в теоретичес-

ком отношении, но имеет и большие практические приложения. Достаточно напомнить, что гипотеза академика О. Ю. Шмидта о происхождении солнечной системы основана именно на проблеме захвата. Согласно этой гипотезе Солнце, двигаясь в пространстве вокруг центра нашей звездной системы (нашей Галактики), «з а х в а т и л о» огромный рой частиц, из которого впоследствии образовались планеты и спутники.

Много интересных качественных проблем связано с происхождением и движением планет и спутников планет.

Выше мы говорили, что распределение орбит астероидов в пространстве неравномерно, причем обнаружено, что чередование «сгущений» орбит малых планет и «пустот» между ними каким-то образом связано со средним суточным движением Юпитера. Большинство «пустот» расположено в тех областях пространства, для которых свойственна с о н з м е р и м о с т ь средних суточных движений астероидов и Юпитера (соизмеримость средних суточных движений означает, что отношение средних суточных движений равно отношению целых чисел). Оказывается, что в случае соизмеримости возмущения со стороны Юпитера намного больше, и не исключено, что большие полуоси орбит малых планет имеют вековые возмущения (заметим, что Лаплас и Пуассон доказали свои знаменитые теоремы, о которых мы говорили выше, при условии отсутствия соизмеримостей). Если бы имелось доказательство того, что в случае соизмеримости обязательно должны существовать вековые возмущения больших полуосей малых планет, то отсюда можно было бы сделать вывод, что происхождение люков объясняется длительным изменением характера движений астероидов под влиянием возмущающего действия не только Юпитера, но и других планет.

Если вековых возмущений нет, то остается считать правильной другую точку зрения: особенности в движениях малых планет, которые наблюдаются в настоящее время, существуют с момента их происхождения.

У нас нет сейчас доводов, которые делали бы ту или иную точку зрения более предпочтительной.

Наконец, следует сказать, что на больших («космогонических») промежутках времени вряд ли можно считать, что массы тел солнечной системы остаются неизменными. Исследование движений в задаче с переменными массами началось относительно недавно, и мы не можем похвастать-

ся очень большими результатами. Известно, в частности, что эволюция движений в задаче двух тел с переменными убывающими массами протекает следующим образом: если в начальный момент скорости тел невелики, то они будут двигаться друг относительно друга по эллиптическим орбитам, большие полуоси и эксцентриситеты которых постепенно увеличиваются. Иными словами, тела будут постепенно удаляться друг от друга, а их орбиты станут все более вытянутыми.

Не до конца исследован вопрос о влиянии сил приливного трения на движение близких спутников планет (Луны, спутников Марса и др.). По-видимому, на больших интервалах времени приливное трение существенно влияет на характер движений в солнечной системе.

6. ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ. АСТРОДИНАМИКА

Прошло почти 10 лет с тех пор, как небесная механика встретила с новыми, неизвестными до тех пор объектами — искусственными небесными телами, создаваемыми человеком. Это — искусственные спутники Земли, космические корабли с человеком на борту, межпланетные станции и космические аппараты, посылаемые к Луне, Венере, Марсу. Перед небесной механикой открылось новое и весьма богатое поле деятельности. Возник новый раздел небесной механики — теория движения искусственных небесных тел, который не приобрел еще, правда, общепризнанного названия. Его называют в литературе «астродинамикой», «космодинамикой», «небесной баллистикой» и т. д. Мы отдадим предпочтение названию «астродинамика», укоренившемуся в известной степени среди специалистов по небесной механике и у нас в стране. Хотя, конечно, следует признать, что этот термин едва ли самый удачный, поскольку условность его очевидна. «Астрон» по-гречески означает «звезда», «небесное светило», а «динамика» — это часть механики, где изучается движение тел под действием сил, так что название «астродинамика» можно было бы применить и ко всей небесной механике в целом.

Астродинамика, цель которой состоит в изучении движений всевозможных искусственных небесных тел, является, конечно, частью небесной механики. Однако

задачи астродинамики все же обладают своими определенными особенностями. Прежде всего, если в классической небесной механике учитываются почти исключительно силы взаимного притяжения небесных тел, то в астродинамике уже никак нельзя ограничиться только такими силами. Приходится обязательно учитывать земную атмосферу, оказывающую сопротивление тем большее, чем ближе к поверхности Земли движутся искусственные небесные тела. На искусственные спутники Земли оказывает влияние давление солнечного излучения, тем более заметное, чем дальше спутник движется от Земли.

На спутник может действовать также магнитное поле Земли. Кроме того, надо рассматривать и реактивные силы, так как на космических аппаратах часто бывают установлены реактивные двигатели, включаемые автоматически или по команде с Земли.

Собственно говоря, реактивные силы надо учитывать всегда, так как изучение движений любых искусственных небесных тел начинается, по существу, с момента их запуска, т. е. с момента, когда они отрываются со стартовой площадки на Земле. Сначала медленно, а затем все быстрее под действием мощных реактивных двигателей начинает удаляться от поверхности Земли многоступенчатая ракета, несущая космический аппарат. Основная действующая при этом сила — это реактивная тяга. Именно она разгоняет ракету до нужной скорости. И пока реактивные двигатели работают, ракета движется, как говорят, по **активному** участку своей траектории.

Основными являются здесь, конечно, различные инженерно-технические вопросы, связанные с контролем реактивной тяги, с управлением газовыми рулями ракеты и т. п. Но надо принимать во внимание и весьма значительное сопротивление воздуха, как это делают, например, в баллистике, а также земное притяжение, изменяющее скорость ракеты.

Наконец, реактивные двигатели, исчерпав горючее, останавливаются. На этом активный участок траектории заканчивается. Начинается, как говорят, пассивное (т. е. неуправляемое) движение по некоторой орбите относительно Земли. Последняя ступень ракеты вместе с запускаемым космическим аппаратом движется далее, главным образом под действием сил притяжения к Земле и другим небесным телам, только за счет энергии, приобретенной

на активном участке. Космический аппарат становится искусственным небесным телом, движение которого может изучаться точно так же, как и движение естественных небесных тел.

Обычно запускаемый аппарат автоматически отделяется от ракеты, как только работа двигателей прекращается. Этот момент называется моментом выхода искусственного небесного тела на орбиту относительно Земли.

Дальнейшее движение будет соответствовать уравнениям, составляемым так же, как и в классической небесной механике. Для изучения этого движения могут быть применены все методы, которые развивались ранее для естественных небесных тел.

Однако, поскольку набор сил, учитываемых в астродинамике, гораздо более широк, то уравнения движения сложнее. При решении этих уравнений недостаточно использовать те методы и результаты, которые были созданы ранее в классической небесной механике, а приходится разрабатывать новые приемы. Очень широко применяются численные методы с использованием новейших вычислительных машин. Это вызвано опять же той причиной, что мы не можем найти решение уравнений движения в общем виде. Эти уравнения для искусственных небесных тел и сами движения в общем случае настолько сложны, что и решение их приближенными методами, развитыми в классической небесной механике, становится весьма трудным. До сих пор нет, по существу, полных аналитических теорий движения тех или иных искусственных небесных тел, какие имеются для многих естественных небесных тел. Вычислительные машины позволяют восполнить в какой-то мере этот недостаток. С их помощью проводится очень много расчетов конкретных траекторий различных искусственных небесных тел. Эти расчеты служат различным целям, о которых мы сейчас скажем.

Дело в том, что в астродинамике возникает целый ряд новых задач. Если оставаться в рамках классической небесной механики, то требовалось бы решить приближенно уравнения движения, дать способ вычислять положения искусственного небесного тела в пространстве, исследовать в той мере, в какой это возможно, общие свойства движения и т. д. Другими словами, достаточно было бы тщательно изучить те движения, которые уже происходят. Но в астродинамике появляются, кроме того, проблемы,

связанные с так называемым проектированием орбит. Ведь каждый запуск искусственного небесного тела — это своего рода эксперимент, преследующий ту или иную цель. В каждом случае требуется, чтобы искусственное небесное тело двигалось определенным образом по определенной орбите. Например, при запуске искусственного спутника Земли может понадобиться, чтобы он оставался в течение какого-то времени на заданной высоте над поверхностью Земли. При запуске межпланетной станции может требоваться, чтобы она достигла, скажем, через 3 месяца Венеры и т. д. Другими словами, орбита запускаемого космического аппарата должна обладать заранее заданными свойствами. Ставятся вопросы: какова же именно должна быть эта орбита (каковы ее элементы), как надо запускать аппарат, чтобы он двигался после запуска именно по этой орбите? В ответах на такие вопросы и заключается проектирование орбит.

Имеются в астродинамике задачи перехода с одной орбиты на другую. Часто космический аппарат сразу после вывода на орбиту еще не движется так, как это требуется для достижения поставленной при запуске цели. Тогда возникает задача о переводе космического аппарата на другую, более подходящую орбиту. Для этого на аппарате должны быть установлены ракетные двигатели, которые можно включить по команде с Земли. Эти двигатели включаются на какое-то время, и они сообщают аппарату дополнительную скорость. В результате космический аппарат начинает двигаться уже по новой орбите.

Двигатели могут включаться на очень короткое время. Тогда аппарат испытывает действие почти мгновенного толчка, импульса. Но вообще реактивные двигатели можно заставить действовать в течение длительного времени. Тогда они будут создавать дополнительную тягу. Вопросы движения космических аппаратов с дополнительной тягой разрабатываются сейчас довольно интенсивно, хотя еще и не воплощались в жизнь. Двигатели на борту космических аппаратов, создающие в течение более или менее длительного времени постоянную тягу, хотя бы малую, еще только проектируются.

При изменении таким путем орбит можно стремиться или к сравнительно небольшому их исправлению (коррекции), или к переводу космического аппарата на совсем другую орбиту. Математическая задача, возникающая при

этом, заключается в том, чтобы заранее определить, какие именно и когда надо сообщить космическому аппарату дополнительные импульсы, чтобы его орбита изменилась желательным образом. Сложность этой задачи заключается в том, что переход с одной орбиты необходимо осуществить наилучшим или, как говорят, оптимальным образом. Другими словами, нужно, чтобы дополнительные импульсы или постоянная малая тяга были как можно слабее по мощности (чтобы затратить как можно меньше энергии и реактивного топлива), но в то же время желательно, чтобы космический аппарат перешел на новую орбиту за возможно более короткий срок. Приходится решать задачу не просто перехода на новую орбиту, но оптимального перехода.

К этому же кругу относятся задачи о возвращении космического аппарата на Землю (с учетом торможения в атмосфере) или о посадке его на Луну и планеты. Требуется перейти с орбиты вокруг Земли или с орбиты перелета на Луну и планеты на посадочную орбиту, по которой космический аппарат плавно опустится на поверхность Земли, Луны или какой-либо планеты. Впервые задача мягкой посадки на другое небесное тело была решена в Советском Союзе. 3 февраля 1966 г. была произведена мягкая посадка межпланетной станции «Луна-9» на поверхность нашего естественного спутника.

Задачи перехода с одной орбиты на другую тесно связаны с инженерно-техническими вопросами конструирования космических аппаратов, их автоматического управления. Воплощение их в жизнь требует общего участия специалистов по небесной механике и инженеров весьма разного профиля. Замечательным примером таких переходных орбит является движение искусственного спутника Луны («Луна-10»), созданного в нашей стране.

Астродинамика выдвигает не только новые задачи, но она заставляет также пересмотреть и ряд «старых» задач классической небесной механики, относящихся к естественным небесным телам. Например, точные расчеты перелетов на другие планеты невозможны без самых точных данных о движении самих планет. Точность имеющихся классических теорий движения планет оказывается сейчас в ряде случаев недостаточной. Ставится вопрос об их уточнении. Надо также уточнить массы планет. При перелетах на Марс важную роль будут играть, по-видимому,

его спутники, обладающие вообще очень интересными свойствами. Полная теория их движения еще ожидает своей разработки.

Таков неполный перечень общих вопросов, появившихся вместе с рождением астродинамики — нового бурно развивающегося, практически очень важного и перспективного раздела небесной механики. Мы хотим теперь остановиться отдельно на движении искусственных спутников Земли, с одной стороны, и автоматических станций, направляемых к планетам, — с другой. Задачи для каждой из этих групп искусственных небесных тел обладают своей спецификой.

Движение искусственных спутников Земли. Как уже говорилось выше, запуск искусственных небесных тел, в том числе спутников Земли, производится при помощи многоступенчатых ракет, в последних ступенях которых вмонтирован запускаемый объект. После старта ракета некоторое время движется главным образом за счет тяги, создаваемой реактивными двигателями. Это — активный участок траектории ракеты, где мы имеем дело еще не с искусственным небесным телом, а скорее с реактивным летательным аппаратом. Но вот двигатели прекратили работу, от ракеты отделяется космический аппарат и начинает свое движение по некоторой орбите. Если расчет активного участка траектории выполнен правильно, то «рождается» искусственное небесное тело.

Возникает сразу вопрос: при каких условиях этот космический аппарат станет спутником Земли? Небесная механика может дать на этот вопрос вполне четкий ответ.

После своего выхода на орбиту космический аппарат движется главным образом под действием притяжения к Земле, во всяком случае если он не удалится слишком далеко от Земли и не будет притягиваться к Солнцу, Луне или планетам сильнее, чем к Земле (об этих случаях мы будем говорить ниже). Если не заботиться о большой точности, то можно считать, что Земля притягивает к себе как материальная точка с массой, равной массе всей Земли. Тогда мы получим задачу двух тел: Земля — космический аппарат, причем масса последнего не может, конечно, идти в сравнение с массой Земли.

Уравнения движения в такой задаче и результаты достаточно хорошо известны, о чем мы говорили выше. Они

описывают так называемое невозмущенное движение космического аппарата. Это будет движение по эллипсу, параболе или гиперболе с фокусом в центре Земли. Фактическое движение космического аппарата в течение некоторого времени будет отличаться от его невозмущенного движения, как правило, не очень значительно.

Пусть в момент выхода на орбиту аппарат находится на расстоянии r_0 от центра Земли и имеет скорость V_0 . Невозмущенная орбита определяется значениями r_0 и V_0 полностью. Если эта скорость меньше параболической (критической), то невозмущенная орбита будет эллипсом и космический аппарат может быть искусственным спутником Земли (в астрономической литературе часто используется сокращенное обозначение ИСЗ).

Перед запуском какого-либо ИСЗ выбирают («проектируют») согласно научным целям данного эксперимента невозмущенную эллиптическую орбиту. Например, часто бывает выгодно, чтобы спутник все время находился примерно на одном и том же расстоянии от поверхности Земли. Этому условию удовлетворяет круговая орбита. Такая орбита получится, если скорость V_0 при выходе на орбиту направлена перпендикулярно радиусу-вектору r_0 (т. е. параллельно горизонту) и равна

$$V_k = 7,91 \sqrt{\frac{R}{r_0}} \text{ км/сек},$$

где R — радиус Земли, который можно принять приближенно равным 6378 км.

Расстояние спутника от поверхности Земли всегда равно примерно $h_0 = r_0 - 6378$ км (рис. 15). Мы говорим «примерно», так как Земля не имеет точной сферической формы. Она сжата у полюсов и ее полярный радиус меньше экваториального на 20 км.

Пусть теперь скорость V_0 спутника в момент выхода на орбиту направлена горизонтально, а по величине больше круговой скорости V_k , но меньше параболической, равной $11,18 \sqrt{\frac{R}{r_0}}$ км/сек (последнюю скорость часто называют второй космической). Тогда орбита будет эллиптической и расположенной так, как это указано на рис. 16.

Перигей P , т. е. самая близкая к центру, а вместе с тем и к поверхности Земли точка орбиты, будет совпадать с положением спутника в момент его выхода на орбиту.

Следовательно, если в этот момент высота над поверхностью Земли равна h_0 , то это — ее минимальная высота при дальнейшем движении по эллиптической орбите.

Апогей A , т. е. наиболее удаленная от центра и поверхности Земли точка орбиты, находится над диаметрально противоположным пунктом земного шара. Имеются простые формулы, выражающие все интересующие нас элементы

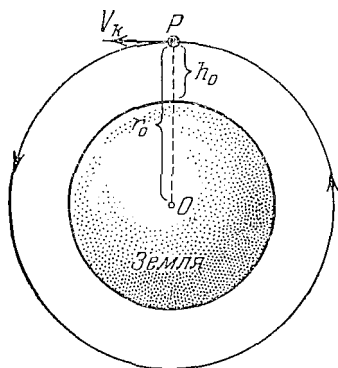


Рис. 15. Круговая орбита искусственного спутника Земли.

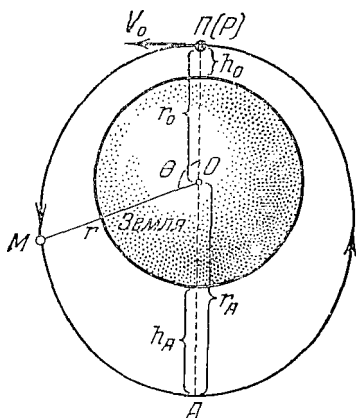


Рис. 16. Эллиптическая орбита ИСЗ в случае горизонтальной скорости V_0 в момент выхода на орбиту.

эллиптической орбиты через начальные скорость V_0 и расстояние r_0 . Через эти элементы выражаются в свою очередь положение спутника и его скорость в пространстве. Например, большая полуось, эксцентриситет и период обращения выражаются формулами

$$a = \frac{r_0}{2 - \left(\frac{V_0}{V_k}\right)^2}, \quad e = \left(\frac{V_0}{V_k}\right)^2 - 1, \quad T = 84,5 \left(\frac{a}{R}\right)^{3/2} \text{ мин},$$

где R — радиус Земли. Средняя скорость движения по орбите равна

$$\bar{V} = 7,91 \sqrt{\frac{R}{a}} \text{ км/сек.}$$

В перигее она увеличивается до значения $V_{\Pi} = \bar{V} \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$,
а в апогее уменьшается до значения $V_A = \bar{V} \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}$.

Пусть теперь скорость V_0 спутника в момент выхода на орбиту также меньше параболической, но направлена под некоторым углом ψ к горизонту. Тогда невозмущенная орбита спутника будет также эллипсом, но расположенным иначе, а именно так, как указано на рис. 17. Большая полуось и период обращения остаются те же, но перигейная (т. е. минимальная) высота над поверхностью Земли h_{Π} будет уже меньше, чем h_0 . Приближенно

$$h_0 - h_{\Pi} \approx \frac{r_0}{2e} \sin^2 \psi,$$

где e — эксцентриситет орбиты.

При проектировании орбит ИСЗ надо обязательно учитывать, что спутник не может сколько-нибудь продолжительное время двигаться слишком низко над поверхностью

Земли из-за сопротивления атмосферы. На высоте 150—160 км и ниже он встречает такое относительно большое сопротивление, что быстро снижается, попадает в еще более плотные слои атмосферы, сильно разогревается и «сгорает», не успев сделать более одного-двух оборотов вокруг Земли. Поэтому невозмущенная эллиптическая орбита должна иметь перигейную высоту h_{Π} более 150—160 км.

Если подходить чисто теоретически, то запуск спутника на эллиптическую орбиту с перигейной h_{Π} и апогейной h_A высотами над поверхностью Земли может производиться весьма различными способами. Но с точки зрения энергетических затрат выгодно, чтобы спутник в момент выхода на орбиту был в перигее, т. е. чтобы активный

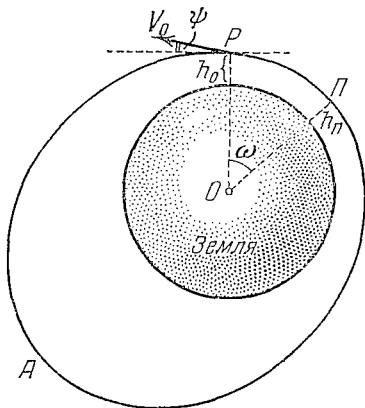


Рис. 17. Эллиптическая орбита ИСЗ в случае отклонения скорости от горизонтального направления.

участок траектории оканчивался как можно ниже над поверхностью Земли. Отсюда вытекает, что направление скорости спутника при выходе на орбиту, т. е. в конце активного участка, должно как можно меньше отличаться от горизонтального (конечно, строго горизонтальную скорость нельзя практически обеспечить). Тогда положение спутника в этот момент будет близким к перигею орбиты. Если же в направлении скорости V_0 допущены ошибки, то перигей может оказаться значительно ниже, чем достигнутая высота h_0 на активном участке, и успех запуска может оказаться под угрозой. Например, пусть $h_0=230$ км, $V_0=8,0$ км/сек, а направление скорости отклоняется от горизонтального на 2° . Тогда перигейная высота оказывается равной около 150 км и спутник быстро прекратит свое существование. Запуск будет неудачным. Апогейная высота довольно сильно зависит от величины скорости V_0 . Например, для первого советского ИСЗ (запущенного 4 октября 1957 г.) она составляла около 950 км, что соответствовало именно скорости $V_0=8,0$ км/час. Для второго и третьего советских спутников перигейная высота была почти такой же, а апогейная — 1670 и 1880 км соответственно. Соответствующие скорости равны 8,15 и 8,20 км/сек. Увеличение V_0 для второго спутника по сравнению с V_0 для первого спутника составило лишь около 1,8%, а для третьего — около 2,8%, в то время как апогейная высота возросла почти в 2 раза.

Таким путем при помощи формул задачи двух тел проектируют невозмущенную орбиту ИСЗ. Точнее говоря, подбирают сначала нужную орбиту и рассчитывают требуемую для этой орбиты скорость V_0 и высоту h_0 в момент выхода на орбиту. Устанавливают, какие ошибки в значениях V_0 и h_0 и в направлении V_0 допустимы, чтобы орбита не слишком исказилась. Затем рассчитывают движение на активном участке траектории и составляют такую программу автоматического управления ракетой, чтобы в конце активного участка траектории она достигла высоты h_0 и имела скорость V_0 . Механизмы ракеты регулируются так, чтобы ошибки в h_0 и V_0 не превышали вычисленных ранее допустимых пределов. На некоторые орбиты выводят спутник не сразу. Например, пусть надо запустить спутник на круговую орбиту с высотой около 40 000 км над поверхностью Земли. Тогда сначала можно вывести спутник на орбиту с малой перигейной высотой, но апо-

гейной высотой около 40 000 км. Затем ставится задача перевода спутника на новую орбиту, что можно сделать с помощью дополнительных импульсов. Когда спутник проходит апогей, включается по команде с Земли реактивный двигатель, который увеличивает скорость спутника. Ее надо увеличить именно до значения круговой скорости на расстоянии 40 000 км от поверхности Земли. После этого спутник и перейдет на нужную орбиту.

Пусть ИСЗ вышел на запроектированную эллиптическую орбиту. Как будет проходить его дальнейшее движение? Как изучают это движение? Какие цели можно при этом ставить?

Невозмущенная орбита отражает фактическое движение спутников Земли лишь приближенно. Возмущения спутников, т. е. их отклонения от невозмущенного движения, происходят прежде всего по двум причинам: 1) из-за сопротивления земной атмосферы, 2) из-за сжатия Земли, т. е. из-за того, что Земля не имеет точной сферической формы и не притягивает точно обратно пропорционально расстоянию до ее центра.

Сопротивление земной атмосферы заметно сказывается на спутниках, которые движутся на высоте до 600—650 км над поверхностью Земли. Правда, для некоторых спутников влияние атмосферы отмечается и на более значительной высоте.

Физически сопротивление земной атмосферы заключается в столкновении спутника с молекулами воздуха, вследствие чего спутник испытывает торможение. Сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости спутника V , плотности воздуха ρ и площади его поперечного сечения S , т. е. выражается формулой

$$R = cS\rho V^2,$$

где c — некоторый коэффициент пропорциональности. Само торможение вследствие действия этой силы по второму закону механики равно $W = \frac{R}{m}$, где m — масса спутника ($m = \frac{Q}{g}$, где Q — вес спутника, $g = 9,81$ м/сек² — ускорение силы тяжести на поверхность Земли). Например, на высоте $h = 225—230$ км, где $\rho = 3 \cdot 10^{-13}$ г/см³, спутник с поперечным сечением 1 м² и весом 100 кг испытывает сопротивление $R = 1,9$ з и торможение $W = 0,019$ см/сек².

Конечно, по сравнению с центростремительным ускорением, вызываемым земным притяжением и равным на высоте 230 км около $9,14 \text{ м/сек}^2$, это торможение очень мало (меньше в 50 000 раз). Тем не менее оно приводит к весьма существенным изменениям в движении спутника.

Вследствие торможения спутник теряет понемногу свою кинетическую энергию и его средняя высота над поверхностью Земли (т. е. большая полуось эллиптической орбиты), а также период обращения постепенно уменьшаются. Но это ведет к тому, что, в конце концов, спутник попадает в плотные слои атмосферы и прекращает свое существование. Таким образом, из-за торможения в земной атмосфере ИСЗ имеют ограниченный срок жизни. Например, первый советский ИСЗ, запущенный 4 октября 1957 г., существовал около трех месяцев. Третий советский ИСЗ, запущенный 15 мая 1958 г., существовал почти 2 года. Чем выше над поверхностью Земли проходит первоначальная орбита спутника, тем больше его срок жизни.

При исследовании уравнений движения ИСЗ с учетом торможения в атмосфере выводятся приближенные формулы, связывающие продолжительность жизни ИСЗ с элементами первоначальной орбиты, плотностью атмосферы, массой и поперечным сечением спутника. Получены также приближенные формулы, показывающие, как уменьшается период обращения с течением времени после запуска спутника.

Эти формулы могут служить для достижения нескольких целей. Во-первых, при проектировании орбиты можно выбрать именно такую начальную орбиту, которая обеспечит требуемый срок жизни спутника. Во-вторых, они позволяют точнее вычислять теоретические положения спутника в пространстве, без чего трудно даже следить за его движением. В-третьих, именно при изучении влияния земной атмосферы на движение спутников мы получаем возможность исследовать свойства самой атмосферы. Дело в том, что строение земной атмосферы очень сложное. Ее плотность изменяется в зависимости от высоты над поверхностью Земли по весьма сложному закону. Кроме того, плотность на одной и той же высоте все время колеблется, причем в значительных пределах. Например, днем (т. е. когда слои атмосферы в данном месте освещаются Солнцем) плотность больше, чем ночью (когда слои находятся в конусе земной тени). На высоте 500 км дневные

значения плотности больше ночных примерно в 3 раза. Кроме того, плотность атмосферы находится в прямой зависимости от процессов, происходящих на Солнце. С повышением солнечной активности плотность земной атмосферы возрастает.

Изменение элементов орбит спутника, в частности периода обращения, находится в прямой зависимости от распределения плотности атмосферы по высоте.

Пусть имеется формула, дающая зависимость между изменением периода обращения данного спутника и плотностью атмосферы на данной высоте. Мы можем вычислить теоретическую кривую изменения периода обращения спутника, принимая плотность известной. Вместе с тем по непосредственным наблюдениям спутника мы определим, как практически изменяется период. Расхождение между теорией и наблюдениями вызвано прежде всего неправильным выбором плотности для теоретических расчетов. Можно установить с помощью тех же формул, какое же должно быть правильное значение плотности, которое соответствует наблюдениям.

Собственно говоря, именно таким путем и были определены современные значения плотности атмосферы на высотах свыше 160—180 км, а также обнаружены упомянутые значительные колебания плотности.

Таким образом, теория движения ИСЗ и наблюдение их являются замечательным средством геофизических исследований земной атмосферы. В данной брошюре трудно говорить об этих вопросах подробнее, но во всяком случае здесь еще много нерешенного и интересного.

Второй основной причиной возмущений ИСЗ является, как мы упомянули выше, сжатие Земли. Ее возмущающее влияние вообще значительно больше по величине, чем влияние атмосферы. Например, если спутник находится в плоскости экватора на расстоянии 6608 км от центра Земли, то его возмущающее ускорение от сжатия Земли равно примерно $1,40 \text{ см/сек}^2$ и меньше основного ускорения (914 см/сек^2) в 656 раз. В то же время возмущающее торможение атмосферы составляет на таком расстоянии от центра Земли для спутника, имеющего массу 100 кг и поперечное сечение 1 м^2 , лишь $1/50000$ долю основного ускорения.

Сами возмущения, т. е. отклонения от движения по неизменной эллиптической орбите из-за сжатия Земли, также больше, чем возмущения из-за сопротивления

атмосферы. Однако они имеют другой характер и не производят существенных изменений самой орбиты. В среднем орбита спутника не изменяет своих размеров и формы из-за сжатия Земли, а лишь постепенно поворачивается в пространстве. Во-первых, орбита вращается в своей плоскости (так называемое вековое перемещение точки перигея

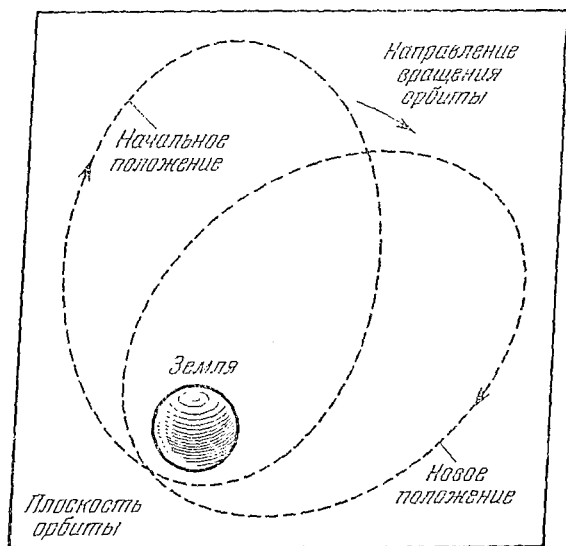


Рис. 18. Вращение орбиты ИСЗ в своей плоскости.

орбиты) и, во-вторых, вращается в пространстве вокруг оси, совпадающей с осью Земли (вековое перемещение восходящего узла орбиты) (рис. 18 и 19). Особенно быстрым является вообще перемещение восходящего узла, происходящее примерно со скоростью $9,97 \left(\frac{R}{a} \right)^{3,5} \cos i$ градусов в сутки.

Например, для третьего советского ИСЗ перемещения перигея и узла составляли примерно $0^{\circ},4$ и $2^{\circ},6$ в сутки соответственно.

Если иметь в виду только влияние сжатия Земли, то задача небесной механики состоит в том, чтобы на основании уравнений движения спутника построить теорию его

движения. Другими словами, надо вывести формулы, по которым можно вычислять возмущения спутника от сжатия Земли на любой момент. Для многих классов спутниковых орбит такие теории уже построены. Эти теории могут использоваться в двух направлениях. Во-первых, считая сжатие известным, мы можем вычислять возмущения от сжатия в любой момент времени. Учитывая дополнительно возмущение от сопротивления атмосферы, мы можем довольно точно вычислить положение спутника в пространстве на много недель или месяцев вперед. Во-вторых, ставится и обратная задача, что приводит непосредственно к более интересным результатам. Другими словами, по наблюдениям того или иного спутника определяется, как фактически перемещается узел его орбиты. После этого может быть определено по формулам теории движения именно то значение сжатия Земли, при котором получается такое перемещение узла. Конечно, все это делается не так просто и прямолинейно, ведь наблюдения дают совокупный эффект всех возмущений. Поэтому надо сначала установить, какая доля наблюдаемых возмущений падает именно на сжатие, т. е. выделить, например, влияние сопротивления атмосферы.

Однако, несмотря на все трудности, оказывается, что определение сжатия Земли из сравнения теории и наблюдений ИСЗ выполняется гораздо точнее, чем это делалось ранее по гравиметрическим и геодезическим измерениям.

Таким образом, астродинамика дала весьма эффективное средство исследования свойств самой Земли. Надо добавить, что речь идет не только об определении сжатия Земли, а вообще об определении в целом закона притяжения или, как говорят, силового поля Земли. Последнее зависит не только от сжатия, но и от многих других параметров, учитывающих все особенности формы Земли и ее внутренней структуры. Ставится задача определения всех этих параметров по всей совокупности точных наблюдений ИСЗ, а также гравиметрических измерений

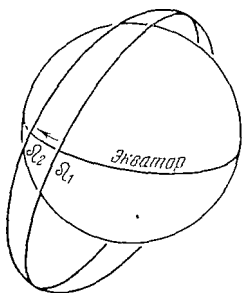


Рис. 19. Вращение плоскости орбиты ИСЗ.

ускорения силы тяжести в различных точках земного шара. Такие исследования привели к очень интересным и важным результатам, хотя, конечно, никак нельзя их считать в какой-то мере завершенными.

Кроме возмущений, вызываемых торможением в земной атмосфере и формой и строением Земли, спутники испытывают еще возмущения от давления солнечного излучения. Они особенно существенны для спутников, имеющих малый вес и относительно большие размеры. На высоте около 600 км над поверхностью влияние солнечного излучения достигает примерно такой же величины, как и торможение в атмосфере. Точный учет этого эффекта, несмотря на его кажущуюся простоту, оказывается довольно трудной задачей. Полной аналитической теории движения спутника с учетом давлений солнечного излучения пока нет, так что при расчетах чаще всего прибегают к помощи электронных вычислительных машин.

К сожалению, рамки этой книги не позволяют затронуть другие интересные вопросы теории движения ИСЗ, к которым относится, например, учет влияния Луны и Солнца (особенно на далекие от поверхности Земли спутники). Кроме того, мы совсем не говорили о вращательном движении спутников вокруг их центров инерции. Изучение такого движения имеет большое значение, например, в связи с вопросами контроля ориентации спутника.

Межпланетные перелеты. Познакомимся теперь с рядом вопросов, связанных с движением межпланетных станций, направляемых к другим планетам. Наиболее интересны для нас сейчас полеты к ближайшим планетам — к Марсу и Венере. Мы были уже свидетелями не одного такого запуска. 12 и 16 ноября 1965 г. в СССР были запущены две межпланетные станции к Венере («Венера-2» и «Венера-3»). Еще раньше, 12 февраля 1961 г. и 1 ноября 1962 г. были запущены межпланетные станции АМС-1 (к Венере) и АМС-2 (к Марсу) в СССР, а 27 августа 1962 г. и 28 ноября 1964 г. — межпланетные станции «Маринер-2» (к Венере) и «Маринер-4» (к Марсу) в США и т. д. Станция «Венера-3» 1 марта 1966 г. достигла поверхности Венеры.

Роль небесной механики в межпланетных перелетах заключается главным образом в проектировании орбит. От нее требуются прежде всего точные ответы на вопросы: с какой скоростью, в каком направлении и когда следует послать космический аппарат с Земли, чтобы он достиг в

нужное время Марса или Венеры. Кроме того, небесная механика дает рекомендации о наиболее выгодных (оптимальных) траекториях перелета с точки зрения различных требований: минимума энергетических затрат, благоприятных условий последующих наблюдений за межпланетной станцией и др.

Остановимся непосредственно на перелете к Венере. Для простоты рассмотрим приближенную картину движения Земли и Венеры. Именно, будем считать, что они движутся вокруг Солнца по круговым орбитам, лежащим в одной и той же плоскости и имеющим радиусы 149,6 млн. км и 108,2 млн. км соответственно (рис. 20). Период

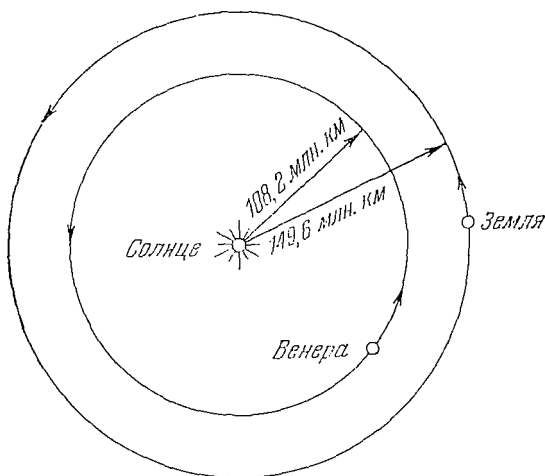


Рис. 20. Круговые орбиты Земли и Венеры.

обращения Земли примем равным 365,25, а Венеры — 224,7 суток. Скорость движения Земли по такой орбите составляет 29,80 км/сек, а Венеры — 35 км/сек. Конечно, это весьма грубая схема, и для осуществления космических полетов к Венере нужны гораздо более точные данные о движении Земли и Венеры, но для пояснения, как именно выбирают орбиты перелетов, эта схема вполне достаточна.

Пусть с Земли запущен космический аппарат. Пока этот аппарат сравнительно близок к Земле, его движение управляется главным образом Землей. Если в момент выхода

на орбиту его скорость была существенно меньше второй космической, то вообще аппарат так и останется вблизи Земли. Но пусть эта скорость больше второй космической скорости на данной высоте, т. е. больше $11,18 \sqrt{\frac{R}{r_{00}}}$ км/сек, где R — радиус Земли и r_{00} — расстояние аппарата от центра Земли в момент выхода на орбиту. Тогда аппарат

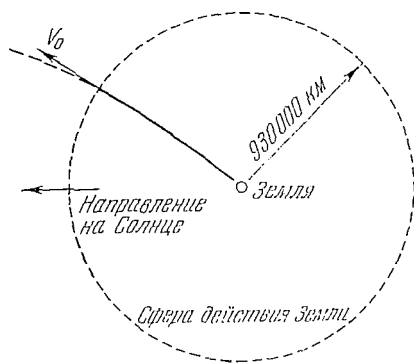


Рис. 21. Выход из сферы действия Земли. V_0 — скорость аппарата в этот момент относительно Солнца.

начнет удаляться от Земли. При этом он будет вначале двигаться примерно по гиперболе относительно Земли. Но когда аппарат удалится от Земли на значительное расстояние, сила притяжения Земли станет малой и на дальнейшее движение аппарата будет влиять главным образом уже сила притяжения других тел солнечной системы, прежде всего Солнца. Говорят, что тогда аппарат выйдет из поля

притяжения (или сферы действия) Земли (имеется в виду не то, что Земля перестанет совсем притягивать аппарат, а то, что ее притяжение перестанет оказывать решающее влияние).

Покинув сферу действия Земли, которая согласно подсчетам имеет радиус около 930 тыс. км, аппарат выйдет, как говорят, на орбиту вокруг Солнца и станет искусственной малой планетой (рис. 21). Эта орбита определится из уравнений движения аппарата его положением и скоростью относительно Солнца в момент выхода из сферы действия Земли.

Орбита космического аппарата относительно Солнца должна быть такова, чтобы она пересеклась с орбитой Венеры. Кроме того, момент запуска надо выбрать так, чтобы аппарат подошел к точке пересечения с орбитой Венеры в то же самое время, что и Венера.

Приблизленно расчеты такой траектории перелета нетрудно произвести, если предположить, что пока аппарат

находится внутри сферы действия Земли, он движется только под действием притяжения к Земле, а как только аппарат пересечет границу этой сферы, он начинает двигаться только под влиянием притяжения к Солнцу.

Пусть рассчитан отрезок орбиты внутри сферы действия Земли. Если не учитывать возмущения от сжатия Земли, от торможения в атмосфере и др., то мы получим невозмущенное движение по гиперболе. Зная скорость и положение космического аппарата в момент выхода на орбиту относительно Земли, мы можем по формулам задачи двух тел рассчитать его положение и скорость в момент, когда он должен достигнуть границы сферы действия Земли и выйти на орбиту относительно Солнца. Пренебрежем расстоянием 930 тыс. км по сравнению с 149,5 млн. км, т. е. будем считать, что аппарат находится в этот момент

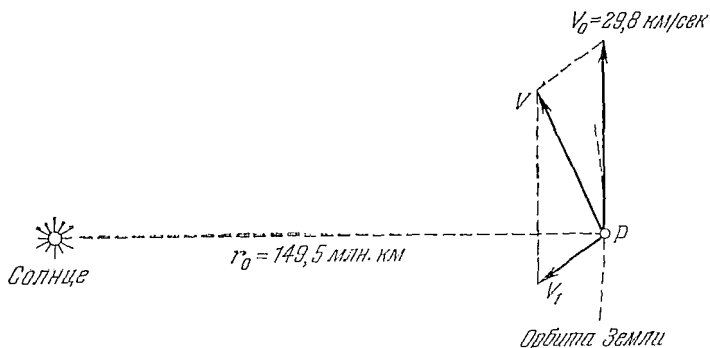


Рис. 22. Схема скорости при выходе космического аппарата на орбиту вокруг Солнца.

на том же расстоянии $r_0 = 149,5$ млн. км от Солнца, что и Земля. На рис. 22 P — положение космического аппарата, V_1 — его скорость относительно Земли. Скорость же аппарата V относительно Солнца находится как геометрическая сумма V_1 и скорости V_0 самой Земли на своей орбите. Если V меньше параболической скорости относительно Солнца, т. е. меньше примерно 42,3 км/сек, то невозмущенная орбита космического аппарата будет эллиптической. Элементы ее целиком определяются скоростью V и расстоянием r_0 .

Имеются формулы, по которым можно выразить большую полуось a , эксцентриситет e и угол ω , определяющий

направление оси симметрии эллипса (линии аписид) через V и r_0 .

Пусть минимальное (перигельное) расстояние r_{Π} для этой орбиты, вычисляемое по формуле $r_{\Pi}=a(1-e)$, меньше, чем 108,2 млн. км. Тогда орбита космического аппарата зайдет внутрь орбиты Венеры, т. е. в какой-то момент пересечется с орбитой Венеры, что и нужно.

Например, пусть $V_1=3,44$ км/сек и угол между V_1 и V_0 равен 137° . Тогда $V \approx 27,36$ км/сек, $a=129,5$ млн. км, $e=0,177$, $r_{\Pi}=106,5$ млн. км, $\omega=4^\circ 13'$.

Орбита с такими параметрами изображена на рис. 23. Таким образом, космический аппарат, имеющий на

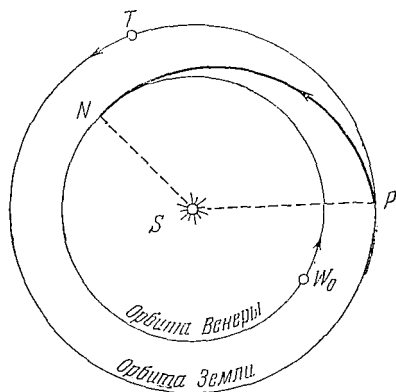


Рис. 23. Траектории перелета на Венеру.

границе сферы действия Земли указанную скорость, достигнет орбиты Венеры в некоторой точке, которую обозначим через N .

Далее нам надо определить, где должна быть в момент t_0 Венера, чтобы она достигла точки N одновременно с запущенным космическим аппаратом. Для этого требуется сначала рассчитать время движения аппарата по отрезку его орбиты PN и угол между направлениями SN и SP . Для данной орбиты получим примерно 105 суток и 130° соответственно. За 105 суток Венера опишет по своей орбите дугу примерно в 168° . Поэтому Венера в момент t_0 должна находиться в такой точке W_0 своей орбиты, что угол между направлениями SP и SW_0 равен около 38° .

Таким образом, если в момент выхода космического аппарата из сферы действия Земли он имеет указанную выше скорость V_1 , а Венера находится в положении W_0 , то через 105 суток он встретится с Венерой.

Земля к этому времени опишет по своей орбите дугу в $103^{\circ},4$ и окажется в положении T , на расстоянии около 71,7 млн. км от Венеры.

Мы получаем, следовательно, возможность указать для данной скорости V_1 такое взаимное расположение Земли и Венеры, что через 105 суток аппарат встретится с Венерой.

Можно решить и обратную задачу: для заданного взаимного расположения Земли и Венеры и заданного времени перелета Δt найти скорость V_1 , а вместе с тем и орбиту космического аппарата, по которой он достигнет через промежуток времени Δt Венеры.

Конфигурация планет известна по таблицам их движения на каждый момент времени, и, таким образом, можно составить, например, таблицу орбит перелета к Венере на каждые сутки и для различных времен перелета. В этой таблице будет указана начальная скорость аппарата по величине и направлению на границе сферы действия Земли на определенный момент времени каждых суток, например на 0^h . Теперь надо рассмотреть движение внутри этой сферы и определить, в какой момент и на какую орбиту относительно Земли надо вывести космический аппарат, чтобы он в 0^h данных суток достиг границы сферы действия Земли, имея в тот момент скорость V_1 .

Эта задача решается по формулам гиперболического движения в задаче двух тел. После этого мы получим таблицу, где даны на каждые сутки моменты запуска космического аппарата с Земли и его начальная скорость относительно Земли, гарантирующие выход на ту или иную орбиту перелета к Венере, а также указаны конфигурации в момент запуска и в момент, когда аппарат должен достичь Венеры.

Мы получим таким путем набор всевозможных орбит перелета к Венере. Теперь ставится вопрос о выборе из них наиболее выгодных с тех или иных точек зрения орбит. Прежде всего можно поставить вопрос, какая орбита требует наименьшей начальной скорости, т. е. наименьших энергетических затрат. Оказывается, что такая орбита получится, если скорость V_1 аппарата на границе сферы действия Земли направлена строго противоположно

скорости V_0 самой Земли и равна около 2,5 км/сек. Тогда орбита перелета соприкасается с орбитой Венеры в одной точке, находящейся на одной линии с Солнцем и начальным положением аппарата (рис. 24). Перелет к Венере по такой траектории занимает около 146—147 суток. Все другие траектории перелета требуют большей скорости V_1 и боль-

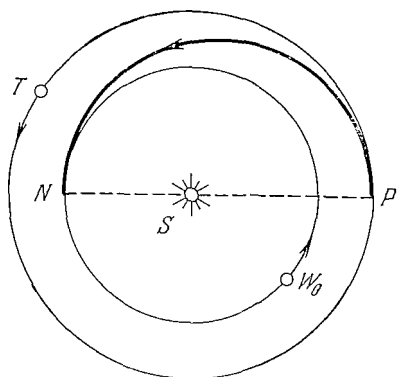


Рис. 24. Перелет по траектории с наименьшей начальной скоростью. W_0 — начальное положение Венеры; N — точка встречи аппарата и Венеры; T — положение Земли в этот момент.

шей скорости при выводе на орбиту относительно Земли. Однако недостатком такой орбиты является сравнительно большое расстояние между Землей и Венерой в момент ее встречи с космическим аппаратом, равное около 90 млн. км. Кроме того, такая орбита очень чувствительна к ошибкам при запуске. Например, как показывают расчеты, уменьшение скорости при выводе на орбиту относительно Земли в 1 м/сек по сравнению с расчетной приводит к тому, что аппа-

рат пройдет на расстоянии около 68 тыс. км от Венеры.

Можно потребовать, чтобы Земля к моменту встречи космического аппарата с Венерой находилась на ближайшем расстоянии от них. Это будет, если встреча происходит в момент нижнего соединения Солнца и Венеры (Венера находится на одной линии с Солнцем и Землей). Расстояние между Землей и Венерой составляет тогда лишь около 41,5 млн. км. Например, такая траектория получится, если в момент t_0 $V_1 = 14,4$ км/сек, причем угол между V_1 и V_0 равен $121^\circ,5$ и угол между направлениями на Землю и Венеру равен около 19° (рис. 25). Время перелета около 30 суток.

Однако эта траектория невыгодна с той точки зрения, что аппарат приблизится к Венере тогда, когда она для земного наблюдателя скроется в лучах Солнца. Радиосвязь с аппаратом будет тогда практически невозможной

из-за больших помех, вызванных радионизлучением Солнца. Кроме того, при выводе на такую орбиту требуется большая начальная скорость при запуске с Земли (около 18 км/сек), которая пока технически недостижима.

Если исходить из требования наименьшей продолжительности перелета, то наиболее выгодной является траектория «падения» на Венеру, когда аппарат движется от

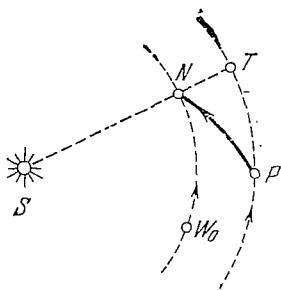


Рис. 25. Траектория перелета при условии наибольшей близости между Землей и аппаратом в момент его встречи с Венерой.

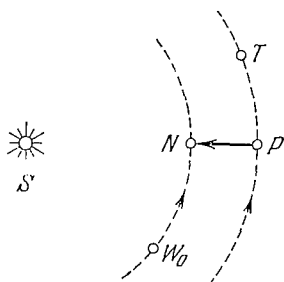


Рис. 26. Траектория «падения» аппарата на Венеру.

границы сферы действия Земли до Венеры по прямой линии (рис. 26). Тогда аппарат достигнет Венеры всего лишь за 25 суток. Однако при выходе на такую орбиту аппарат должен иметь скорость $V_1 = V_0 = 29,76$ км/сек, а скорость при запуске с Земли около 31,7 км/сек, что пока технически недостижимо.

Наиболее выгодными (оптимальными) оказываются орбиты промежуточного характера по сравнению с описанными, а именно примерно такие, какие изображены на рис. 23. Для них требуется сравнительно небольшие и вполне доступные в настоящее время начальные скорости. Время перелета составляет 3—4 месяца, расстояние между Землей и космическим аппаратом в момент его сближения с Венерой составляет около 70 млн. км. Нижнее соединение Венеры с Солнцем происходит где-то посередине между моментом запуска аппарата и его сближением с Венерой. Именно такими были орбиты межпланетных станций АМС-1 и «Маринер-2».

Приведем некоторые данные о полетах межпланетных станций «Венера-2» и «Венера-3».

Угол между направлениями на Землю и Венеру (т. е. угол W_0SP на рис. 26) составлял на 16 ноября 1965 г. (день запуска станции «Венера-3») по данным астрономического ежегодника около 42° . За 3,5 месяца Венера описала дугу, равную приблизительно 168° . Нижнее соединение Венеры и Солнца имело место 26 января 1966 г. 1 марта 1966 г., в момент встречи станции «Венера-3» с планетой, последняя опережала Землю примерно на 20° . Эти данные вполне соответствуют орбите, изображенной на рис. 23.

Таким образом мы отберем из упомянутой выше таблицы лишь определенный класс орбит, выгодных практически. В частности, моменты запуска на эти орбиты уже не любые, а такие, которые соответствуют лишь определенным конфигурациям Земли и Венеры, а именно за 1,5—2 месяца до нижнего соединения Венеры с Солнцем.

Мы рассказали о том, как проводится предварительное проектирование (т. е. выбор и расчет) траекторий перелета. Но это лишь первый и, пожалуй, не самый трудный этап. Ведь мы предполагаем, что и Венера и Земля движутся вокруг Солнца равномерно по круговым орбитам и что внутри сферы действия Земли на космический аппарат влияет лишь сила притяжения Земли, а вне этой сферы — лишь притяжение Солнца. Эта схема весьма отличается от истинной картины.

Прежде всего надо иметь в виду, что движение Земли и Венеры описывается более точно как движение по эллиптическим орбитам, причем плоскости этих орбит наклонены друг к другу (примерно на $3^\circ,4$). Ошибки в расстоянии между Землей и Венерой, если не учитывать эллиптичности орбит, достигают 5—6 млн. км. Но, кроме этого, надо учесть, что:

1) Земля и Венера движутся даже не по эллиптическим, а по очень сложным орбитам, определяемым взаимным притяжением всех планет солнечной системы;

2) выделение сферы действия Земли носит, по существу, лишь условный и вспомогательный характер. Вдоль всей траектории перелета на космический аппарат влияет притяжение Земли, Венеры, Солнца и других планет, прежде всего Юпитера.

Внесение поправок в траекторию перелета за счет этих факторов, без чего можно «промахнуться» на несколько миллионов километров, требует очень больших и сложных

вычислений. Для этого надо решать уравнения движения космического аппарата сначала внутри сферы действия Земли, а затем вне этой сферы, учитывая все, по возможности, существенные возмущающие силы. Эти уравнения достаточно сложны, и до сих пор нет полной аналитической теории траекторий перелета на другие планеты. В настоящее время используют почти исключительно результаты численных расчетов на электронных вычислительных машинах. Именно с их помощью получают те расчетные траектории, на которые фактически запускаются сейчас межпланетные станции.

Задача запуска осложняется еще тем, что практически нельзя вывести космический аппарат точно на расчетную орбиту. Неизбежны какие-то ошибки в начальной скорости по величине и направлению, из-за чего аппарат уклоняется от расчетной траектории. Поэтому весьма важным является вопрос о коррекции орбиты уже на пути аппарата к Венере. Такая коррекция осуществляется с помощью ракетных двигателей, включаемых по команде с Земли и изменяющих скорость аппарата. Для этого необходимо сначала по наблюдениям за полетом аппарата определить, насколько его орбита отличается от расчетной. Астродинамическая задача состоит в том, чтобы по известным отклонениям определить, как и в какой момент надо изменить скорость аппарата и «возвратить» его на траекторию, достигающую Венеры.

Таковы общие проблемы, возникающие в астродинамике при проектировании межпланетных перелетов. Имеется целый ряд других интересных вопросов, на которых мы не останавливались. Например, мы не затрагивали вопросы перелетов к Луне, создания искусственных спутников Луны, Венеры, Марса, использования спутников Марса как промежуточных «пересадочных» станций и др.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой книге мы преследовали цель познакомить читателя с кругом проблем, которыми занимается небесная механика, и с методами, применяемыми в небесномеханических исследованиях. В заключение мы хотим остановиться на некоторых, на наш взгляд интересных вопросах развития этой науки, а также рассказать о ряде проблем, которые ждут своего решения.

Из изложенного выше видно, что небесная механика — весьма сложная и весьма разнообразная наука, соприкасающаяся с различными областями исследований. Здесь и вопросы математики, и механики, и астрономических наблюдений, и ракетодинамики и пр. Она, как и все другие естественные науки, непрерывно развивается. Развитие небесной механики заключается в том, что появляются новые области исследований, разрабатываются новые методы (как, например, в астродинамике), пересматриваются ранее созданные и, казалось бы, уже установившиеся теории. Вместе с тем в небесной механике происходит процесс расслоения и дифференциации различных направлений исследования.

Вначале, когда небесная механика только создавалась, она занималась лишь движением естественных небесных тел, образующих семью Солнца, а именно:

- 1) теорией поступательного движения небесных тел;
- 2) теорией вращательного движения небесных тел вокруг собственной оси, прежде всего Земли и Луны;
- 3) общими математическими исследованиями в задаче трех и n тел;
- 4) теориями, которые исследуют форму и структуру небесных тел, прежде всего больших планет;
- 5) теорией приливов и отливов.

В дальнейшем большинство исследований по небесной механике было посвящено разработке пунктов 1), 2), 3). Теория приливов и отливов в ходе развития «отслонлась» от небесной механики, и сейчас ею занимаются преимущественно специалисты в области геофизики. Теорией фигуры Земли и других планет в настоящее время небесные механики также занимаются сравнительно мало. Таким образом, эти проблемы почти ушли из небесной механики, и хотя такой процесс дифференциации естествен, однако полная последующая изоляция крайне нежелательна. По нашему мнению, небесные механики и геофизики должны в дальнейшем совместно разрабатывать общие комплексные проблемы, смежные для обеих наук. Например, имеется много задач в теории вращательного движения Земли (замедление вращения Земли, колебания полюсов мира и др.), полное решение которых невозможно, если не привлечь теорию приливов и отливов водной оболочки и твердой поверхности Земли.

Очень интересным является вопрос о движении спутников Марса, не раз упоминаемый в последнее время в печати. Едва ли можно надеяться на его решение без учета приливных сил.

Аналогичный процесс отделения от небесной механики произошел со звездной динамикой. Дело в том, что во второй половине XIX в. возник новый раздел небесной механики, мало связанный с ее традиционными задачами и методами, относящийся к изучению движений звезд и звездных систем. В соответствии с определением небесной механики она должна целиком включать в себя и изучение звездных движений, но исторически сложилось так, что звездная динамика как бы отпочковалась от небесной механики и стала самостоятельной областью, в которой работают специалисты по звездной астрономии. Это произошло прежде всего по той причине, что в звездной динамике с самого начала преобладали свои специфические методы, близкие к методам статистических исследований. В настоящее время сложилось такое положение, когда движением звезд, т. е. таких же небесных тел, как и тела солнечной системы, и движущихся по тем же самым законам механики, специалисты в области небесной механики, по существу, не занимаются. Без сомнения, для изучения движений звезд необходим тесный контакт между деятелями небесной механики и звездной астрономии. На наш взгляд, такой контакт может быть достигнут на базе применения, с одной стороны, качественных методов небесной механики, а с другой стороны, массовых расчетов на современных электронных вычислительных машинах.

С математической точки зрения некоторые задачи небесной механики (задача трех тел, задача n тел) ставят перед учеными непреодолимые в настоящее время трудности. Их решение на основе применения уже созданных математических методов, по существу, невозможно, поэтому успешное их решение может быть найдено лишь на основе новых методов, создание которых явилось бы результатом совместных усилий математиков и небесных механиков.

Остановимся теперь на некоторых проблемах небесной механики, которые ждут своего решения. При этом мы сталкиваемся с двумя особенностями. Некоторые проблемы небесной механики хотя и решены в известной степени, тем не менее практика ставит перед специалистами вопрос о

нахождении более точного, более полного решения. Другие же проблемы пока не решены.

Перечислим некоторые из них.

1. Построение более точных теорий движения больших планет и естественных спутников планет. Современные теории движения больших планет определяют их положение с точностью до тысяч и десятков тысяч километров. Между тем для астродинамики такая точность неудовлетворительна. Нуждаются в уточнении и данные о массах больших планет и спутников.

2. Построение точных теорий движения ряда астероидов для нужд астрометрии. Наличие таких точных теорий позволило бы уточнить всю систему фундаментальных астрономических постоянных.

3. Более точное исследование вращательного движения Земли и уточнение постоянных прецессии и нутации.

4. Исследование свойств движения интересных групп астероидов.

5. Проблема устойчивости реальной солнечной системы и связанная с этим разработка новых математических методов.

6. Нахождение наиболее интересных решений задачи трех и n тел.

7. Теоретическое исследование ошибок приближенных решений уравнений движения небесной механики.

8. Имеется много проблем и в астродинамике, о чем мы писали в предыдущем разделе. В частности, исследование движений космических аппаратов с учетом активных сил (малая тяга, корректирующие импульсы и др.); теория движения искусственных спутников Земли с полным учетом существенных сил (эффект сжатия Земли, сопротивление атмосферы, давление солнечного излучения, магнитные силы и др.); аналитические теории межпланетных перелетов.

Конечно, перечень приведенных выше проблем небесной механики не претендует на полноту. Мы могли бы привести много других, не менее интересных и важных проблем, но для их формулировки пришлось бы прибегнуть к специальным математическим терминам и понятиям.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Основные законы, уравнения движения и постановка задач небесной механики	19
3. Небесная механика — часть астрономии. Основные характеристики тел солнечной сис- темы	38
4. Методы небесной механики	55
5. Конкретные результаты небесной механики	67
6. Изучение движений искусственных небесных тел. Астродинамика	83
7. Заключение	107

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ:

- А г е к я н Т. А., Звезды, галактики, Метагалактика, «Наука», 1966, 347 стр., 89 коп.
- Г р е б е н н и к о в Е. А., Д е м и н В. Г., Межпланетные полеты, «Наука», 1965, 200 стр., 45 коп.
- К а п л а н С. А., Физика звезд, Физматгиз, 1961, 152 стр., 24 коп.
- К а п л а н С. А., Элементарная радиоастрономия, «Наука», 1966, 276 стр., 59 коп.
- М е н з е л Д. Г., Наше Солнце. Перев. с англ., Физматгиз, 1963, 328 стр., 79 коп.
- П а р ш и н Н. А., Луна, Физматгиз, 1960, 55 стр., 10 коп.
- П и к е л ь н е р С. Б., Солнце, Физматгиз, 1961, 82 стр., 13 коп.
- Э л л и с о н М. А., Солнце и его влияние на Землю. Введение в исследование проблемы Земля — Солнце. Перев. с англ., Физматгиз, 1959, 216 стр., 71 коп.

Вышеперечисленные книги требуются в магазинах Книготорга. Письменный заказ можно направить также в ближайший отдел «Книга — почтой» республиканского, областного, краевого книготорга.

Литература будет выслана наложенным платежом. При отсутствии этих книг на месте следует обратиться по адресу: Москва, К-31, Петровка 15, магазин № 8 Москниги, отдел «Книга — почтой».

ПОПУЛЯРНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО АСТРОНОМИИ

- Вып. 1. П. П. Паренаго. Астрономические обсерватории (Как изучают небо), Гостехиздат, 1953.
- Вып. 2. Ф. Ю. Зигель. Кометы. Изд. 2-е, Гостехиздат, 1955.
- Вып. 3. Б. Ю. Левин. Происхождение Земли и планет. Изд. 4-е, дополн., Издательство «Наука», 1964.
- Вып. 4. В. В. Федьинский. Метеоры, Гостехиздат, 1956.
- Вып. 5. П. П. Паренаго. В мире звезд, Гостехиздат, 1956.
- Вып. 6. В. Н. Комаров. Движения звезд, Гостехиздат, 1957.
- Вып. 7. К. А. Куликов. Астрономия на службе народного хозяйства, Гостехиздат, 1957.
- Вып. 8. Е. Л. Кринов. Метеориты, Физматгиз, 1958.
- Вып. 9. Э. В. Кононович. Солнечная корона, Физматгиз, 1958.
- Вып. 10. И. А. Паршин. Луна, Физматгиз, 1960.
- Вып. 11. С. Б. Пикельнер. Солнце, Физматгиз, 1961.
- Вып. 12. Н. Н. Сытинская. Планета Марс, Физматгиз, 1962.
- Вып. 13. В. Г. Тейфель. Планеты-гиганты, Издательство «Наука», 1964.
- Вып. 14. Е. А. Гребеников, Ю. А. Рябов. Что такое небесная механика, Издательство «Наука», 1966.
-