

Н.В.Емельянов

**ДИНАМИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

ГАИШ МГУ - 2019

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ОБЩИЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ДИНАМИКИ СПУТНИКОВ

Резюме

В этой главе происходит первое свидание читателя с автором. Это очень важный момент. Поэтому здесь представлен общий взгляд автора на всю тему книги. Объясняются специфические особенности науки о динамике естественных спутников планет. Показаны цели всего этого дела и какой от него толк.

Для хорошего понимания всегда нужен общий язык. Поэтому в этой первой главе даны основные понятия, которыми оперирует автор. В отдельных научных сообществах вырабатываются свои определения вещей, иногда даже свой жаргон. Автор использует здесь те определения и понятия, которыми пользовались в свое время его учителя, и которые обычно используются в лекциях на астрономическом отделении Физического факультета МГУ.

Далее в главе представлен основной методический подход. Этому подходу подчинен весь последующий материал книги. В книге сделана попытка разностороннего описания динамики естественных спутников планет. Однако главное заключается в построении моделей движения на основе наблюдений. Во многих других задачах исследователи становятся пользователями этих моделей.

1.1. Введение

Сознание того, что во все стороны от нас простирается необъятная Вселенная, всегда беспокоило человека. Это вызывает двойное желание. Во-первых, хорошо бы понять своё место в необозримом

пространстве и бесконечном разнообразии мира. У человека нередко возникает легкий дискомфорт от отсутствия ответа на подобный вопрос. Одновременно рождается желание извлечь из Космоса выгоду для удовлетворения своих постоянно возрастающих потребностей. Еще большее беспокойство испытывает человек, обнаружив угрозу своей жизни со стороны сил природы. Ничто так не пугает нас, как непонятное. Удивительно легко успокоить человека объяснением страшных явлений даже не совсем знакомыми словами. Сознание того, что хоть кто-то разбирается в деяниях природы, возвращает нас к привычному комфорту повседневной жизни. Вот почему мы должны быть благодарны тем немногим людям, которые работают, чтобы избавить нас от мучительных вопросов о космосе и судьбе.

С древних времен люди задумывались о влиянии небесных светил на земную жизнь. Попытки сопоставить небесные явления с судьбой человека делались как учеными, так и далекими от науки предприимчивыми личностями. Однако во все времена неизменно получался весьма ненадежный результат. Что касается судьбы самих небесных тел, то астрономы и математики давно рассчитали удивительно устойчивый характер их движения. Размеры и формы орбит планет, наклоны осей их вращения почти не изменились даже на космогонических интервалах времени.

Ученые-естествоиспытатели и философы пришли к выводу, что главная причина существования Разума во Вселенной — это функция познания. Разумная жизнь характеризуется стремлением понять и объяснить происходящие вокруг явления.

На любом этапе познания Вселенной мы уже имеем более или менее адекватную ее модель. Новые, более точные наблюдения приводят к рассогласованию модели с действительностью. Чаще всего желаемое согласование модели восстанавливается путем уточнения известных параметров движения или состояния небесных тел. Иногда приходится значительно совершенствовать теории, методы построения модели или методы вычислений. Процесс невольно направлен на обнаружение новых, необъясненных явлений. На некотором этапе удается добыть эту столь необходимую Разуму «пищу», но этому всегда предшествует колоссальный труд ученых — наблюдателей, теоретиков, вычислителей. Модели движения небесных тел ценны еще тем, что позволяют нам предвычислять их расположение на любой момент времени в прошлом или будущем.

Лишь тогда есть толк в теории, когда она представляет собой не только абстрактные конструкции в воображении очарованного теоретика, но и хорошо отлаженные процедуры, исправно служащие целям практического познания природы. Одним из главных инструментов на таком пути является практическая небесная механика. Именно практическая небесная механика дает нам наиболее полные и точные знания о динамике спутников планет.

1.2. Небесная механика — основа изучения динамики спутников планет

Небесная механика — область науки, которая занимается изучением движений небесных тел под действием естественных сил природы.

Предметом небесной механики являются механические формы движения материи.

Объекты исследований — всевозможные материальные образования, от мельчайших частиц космической пыли до колоссальных систем типа звездных скоплений, галактик и скоплений галактик.

Цель небесной механики — познание законов природы, управляющих механическими движениями небесных тел.

Для всего естествознания небесная механика играет роль фундамента, без которого немислимо познание Вселенной и освоение Космоса. Значение небесной механики для жизни на Земле состоит в использовании знаний о движении небесных тел и ближнем Космосе для лучшего удовлетворения потребностей человека и его защиты от сил природы. Теория движения искусственных спутников Земли позволяет использовать космические аппараты для коммуникации и исследования земных ресурсов. Теория движения астероидов, комет и метеоров дает оценку опасности попадания этих тел в атмосферу и выпадения на земную поверхность. Исследования движений тел Солнечной системы позволили создать фундаментальную систему отсчета — модель инерциальной системы, реализованную небесной механикой и астрометрией в форме астрономических ежегодников и фундаментальных звездных каталогов.

В недрах небесной механики возникли, оформились и развились многие наиболее эффективные методы математической физики и вычислительной математики.

В качестве примера (и отнюдь не единственного!) можно указать методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих различные природные явления и рукотворные процессы. Зародившись в небесной механике, эти и другие численные методы получили широчайшее распространение в науке и технике. В XVII-XVIII веках с решения астрономических задач методами небесной механики началась, по существу, и вся теоретическая физика.

Не только преимущественно теория систем обыкновенных дифференциальных уравнений, как это было в прошлом столетии, но, по сути дела, весь арсенал современных средств прикладной математики используется современной небесной механикой при моделировании движений космических объектов.

1.3. Цели изучения динамики спутников планет

Основная цель изучения динамики тел Солнечной системы — знание движения планет и их спутников. Задача совпала с вечной проблемой человечества — расширением и изучением среды обитания. Спутники больших планет — наиболее подходящие места для посадки автоматических и обитаемых космических аппаратов. Изучение строения и динамики тел Солнечной системы является важной частью динамической астрономии. Решается эта задача методами небесной механики на основе астрометрических наблюдений. Новая задача динамики тел Солнечной системы, возникшая во второй половине XX века, — межпланетная навигация.

Общий подход к изучению динамики — создание моделей движения и эфемерид планет, астероидов и естественных спутников планет. Процесс основывается на общих законах природы, физических параметрах небесных тел и, самое главное, на их наблюдениях. Используются современные математические методы и самые совершенные методы вычислений. Эфемериды являются конечным результатом исследований, так как содержат в себе все знания о динамике тел Солнечной системы.

Эфемериды нужны для определения физических свойств небесных тел. С их помощью изучается происхождение и эволюция Солнечной системы. Эфемериды нужны также для подготовки и проведения космических миссий к другим планетам. С помощью эфемерид открывают новые небесные тела. Еще в середине XIX века

французский ученый Леверье на основе эфемерид открыл новую планету Нептун. Процесс открытия новых планет и спутников таким путем продолжается и сейчас. В итоге мы заключаем, что эфемериды являются средством исследований, так как содержат в себе все знания о движении планет и спутников.

Результаты и выводы небесной механики явно и незримо присутствуют во многих других областях науки и практической деятельности человека.

1.4. Основные понятия небесной механики и астрометрии

Установим некоторые основные понятия практической небесной механики и астрометрии, которыми мы будем оперировать в последующем изложении.

Объектами наших исследований являются планеты и спутники Солнечной системы. На пути исследований оперируют с моделями небесных тел, которых в природе не существует, но которые в известной мере мало отличаются от реальных небесных тел. Примерами таких объектов могут служить материальная точка или абсолютно твердое однородное тело, ограниченное поверхностью трехосного эллипсоида.

Законы движения. Реальным проявлением движения небесных тел является изменение их взаимного расположения, которое определяется взаимными расстояниями. Для задания движения системы небесных тел следует задать закон изменения их взаимных расстояний во времени. Математическим описанием законов движения являются те или иные функции времени.

Для удобного отображения движения небесных тел оперируют понятиями системы отсчета, системы координат и шкалы времени. Абстрактное понятие системы координат так или иначе связывают с реальными небесными телами. Примерами могут служить Гринвичский меридиан на Земле или внегалактические радиоисточники излучения. Абстрактное понятие шкалы времени связывают с реальными физическими процессами. Примерами могут служить вращение Земли или электромагнитное излучение атома.

Законы взаимодействия. Основой для изучения движения небесных тел являются строго установленные из наблюдений законы физики, которые описывают взаимодействия тел или воздействия на

них той среды, в которой они движутся. Математической формой законов взаимодействия небесных тел оказываются обыкновенные дифференциальные уравнения, которым удовлетворяют взаимные расстояния между небесными телами или их координаты.

Механическая модель. В небесной механике используют понятие механической модели. Модель описывается составом движущихся объектов, их свойствами, заданием сил, действующих на отдельные компоненты модели. Механические модели используются либо для приближенного описания движений небесных тел либо как основа для разработки более точных методов описания их движений.

Задачей практической небесной механики считается создание и исследование различных механических моделей, а также изучение и описание движения реальных небесных тел.

Механическая модель, являясь, как правило, приближенным описанием движения системы реальных небесных тел, может принципиально от нее отличаться. В частности, свойства тел в модели могут не соответствовать реальности, а законы действующих сил могут задаваться специальным образом. Примерами могут служить задача о движении системы **материальных точек**, в которой небесные тела не имеют размеров, или **ограниченная задача трех тел**, не удовлетворяющая третьему закону Ньютона.

Наблюдения. Измеряемые величины. Источником наших знаний о небесных телах являются наблюдения. Наблюдая, мы не можем довольствоваться констатацией факта наличия небесного тела на небе. В процессе астрономических наблюдений выполняются измерения тех или иных величин. Делается это с помощью разнообразных приборов. В отличие от абстрактных координат, измеряемая величина всегда реальна. Она образуется в измерительном приборе. Астрономы имеют дело с богатым разнообразием приборов и измеряемых величин. Примерами могут служить углы поворота оси телескопа относительно отвесной линии и плоскости меридиана, расстояния между изображениями небесных тел на фотопластинках, промежуток времени между вспышкой лазерного дальномера и фиксацией в телескопе отраженного от небесного тела светового импульса, интенсивность засветки отдельного пиксела полупроводникового приемника света, разность продолжительностей записи фрагмента излучения космического радиоисточника на двух радиотелескопах.

Точность наблюдений. Приборам присуща погрешность. Таинства процессов, происходящих в измерительных приборах, оставляют нам лишь возможность строить гипотезы относительно ошибок измерений. Никогда не бывает известна величина ошибки отдельного измерения. Очень часто мы предполагаем, что погрешности чисто случайны, и рассматриваем различные статистические характеристики ошибок. Чаще всего оперируют с понятием наиболее вероятной среднеквадратичной величиной ошибки. Конструктивные свойства измерительных приборов иногда позволяют приближенно установить точность измерений. В общем случае мы говорим о *точности наблюдений*.

Время. Изменение измеряемой величины во времени обусловлено движением небесных тел. Измерение выполняется в некоторый момент времени. Момент отсчитывается по часам обсерватории. В практической небесной механике измеряемой величине всегда приписывают конкретный момент измерения.

Время является абстрактным понятием, для его определения нужны какие-нибудь измерительные приборы. Любой прибор имеет собственную погрешность измерения. Сначала время измеряли углом вращения Земли. Такое время называли всемирным и обозначили через УТ. Когда были обнаружены расхождения теории движения Луны с наблюдениями, стало ясно, что Земля вращается неравномерно, и эталоном стало время, как независимая переменная в теории движения Луны. Время, измеряемое по наблюдениям Луны, называлось эфемеридным временем и обозначалось ЕТ (Ephemeris Time). Однако точность наблюдений Луны все же ограничена. Поиски более точного измерителя времени привели к атомным часам. Этот датчик времени является сейчас наиболее точным. Время, осредненное по нескольким наиболее точным атомным часам мира, называют международным атомным временем и обозначают IAT.

В дальнейшем мы будем говорить о наблюдениях небесных тел, всегда предполагая при этом получение той или иной *измеряемой величины* на некоторый момент времени — *момент измерения*.

Точность астрономических измерений достигла уже такого уровня, что стала заметна неадекватность классической ньютоновской механики наблюдаемому движению небесных тел. В более точной общей теории относительности время течет различно в любых двух

точках пространства. Для связи различных шкал времени нужно учитывать движение тел и их массы.

Параметры движения. Изучая планеты и спутники, звезды и галактики мы смело предполагаем, что все время остаются постоянными некоторые параметры, присущие небесным телам и их движению. К ним относятся масса, размеры и форма тел, параметры орбиты и многие другие величины. Эти параметры невозможно непосредственно измерить с помощью имеющихся приборов. Однако их значения реально проявляют себя в наблюдаемом движении небесных тел. Будем называть в дальнейшем такие величины *параметрами движения* небесных тел.

Системы координат. Измеряемые величины не дают наглядных представлений о конфигурации системы небесных тел и тем более непригодны непосредственно для выражения общих законов движения. Удобным средством описания пространственного расположения тел и направлений на небесные светила являются системы координат. Когда говорят о положении светила или об ориентации тела в некоторой системе координат, имеется в виду абстрактные оси координат в пространстве и воображаемые линии на небе. Системы координат выбираются так, чтобы дать ясное представление о законах и свойствах движения небесных тел.

Выбор системы координат обусловлен удобством описания и изучения движения конкретного небесного тела. Начало и оси координат связывают либо с деталями объекта, например с гринвичским меридианом Земли, либо с его динамическими свойствами, например, с главными осями инерции тела, либо со свойствами движения, например, с осью вращения тела, либо с положением тела в некоторый момент времени, либо выбирают систему координат другим специальным образом.

Чаще других используется система прямоугольных или декартовых координат, ее начало обозначают буквой O , а оси — буквами x , y , z . Столь же часто применяется система сферических координат с обозначением центрального расстояния буквой r , широты — буквой φ и долготы — буквой λ .

Любые системы координат с началом, расположенным в точке наблюдения, называются топоцентрическими. Направления осей топоцентрической системы связывают с линией отвеса и местным меридианом. Говорят о геоцентрических системах координат, когда начало помещено в центр масс Земли.

Законы движения небесных тел — это зависимости координат тел от времени и параметров движения. Зависимости могут принимать различные формы. Чаще всего используются аналитические функции, описывающие явную зависимость координат от времени. В некоторых случаях зависимость дается в неявной форме, тогда координаты получаются путем вычислений по формулам последовательными приближениями. Закон движения может иметь форму числовых таблиц, в которых значения координат небесных тел заданы на ряд фиксированных моментов времени, обычно следующих с каким-то постоянным шагом. При таком численном задании закона движения теряется зависимость координат от параметров движения небесного тела. В этом случае затруднен анализ свойств движения, и мы ограничены тем интервалом времени, для которого координаты были вычислены.

Координаты небесных тел являются абстрактными понятиями. Их нельзя измерить никакими приборами. Системы координат моделируются с помощью формул и алгоритмов и являются составной частью модели движения небесных тел.

Модель движения небесного тела.

Мы не знаем точно, как устроены небесные тела и по каким точным законам они движутся. Поэтому приходится довольствоваться изучением моделей движения, выдвигая смелую гипотезу о том, что наши модели мало отличаются от действительности.

В общем случае под моделью движения небесного тела мы будем подразумевать некоторую конструкцию, позволяющую определять значения измеряемой величины на любые заданные моменты времени при известных значениях параметров движения.

Реализации модели движения небесного тела могут иметь весьма различные формы. Это могут быть математические формулы, написанные вручную на бумаге или опубликованные в виде печатного материала. Это могут быть напечатанные числовые таблицы значений координат. В настоящее время и формулы и таблицы отображаются в памяти компьютеров. При этом формулы преобразуются в алгоритмы вычислений, а таблицы доступны вычислительным программам, решающим те или иные задачи. Однако даже в эпоху мощной вычислительной техники в нескольких научных центрах мира создаются и печатаются в форме астрономических ежегодников координаты основных небесных тел, вычисленные на несколько лет вперед.

Откуда же берутся законы движения небесных тел? В старые времена они устанавливались почти эмпирически из простых наблюдений. Сейчас же, конечно, законы движения находят в процессе решения дифференциальных уравнений движения относительно координат небесных тел. Составляют эти уравнения на основе строго установленных законов физики, которые описывают взаимодействия тел или воздействия на них той среды, в которой они движутся. Это делается в рамках какой-либо механической модели. Четко фиксируются все факторы, влияющие на движение каждого тела системы и включенные в рассматриваемую модель. Процесс построения законов движения небесных тел, а также его результат — сами законы движения, называют теорией движения. Именно этим занимается небесная механика.

В подавляющем большинстве задач небесной механики невозможно получить точное решение уравнений движения. Приходится довольствоваться либо приближенным решением точных уравнений, либо точным решением приближенных уравнений. Применяются как аналитические, так и численные методы решения дифференциальных уравнений. В обоих случаях решение обладает погрешностью. Эта погрешность может быть более или менее достоверно оценена с помощью самой теории.

Точность модели движения небесного тела. Исходными данными для модели движения небесного тела являются параметры движения, которые в свою очередь известны с некоторой погрешностью. Эта погрешность также повлияет на точность предвычисления координат небесного тела и точность предвычисления измеряемой величины. В дальнейшем мы будем говорить о *точности модели*, подразумевая погрешность вычисления измеряемой величины. При этом мы разделяем два источника этой погрешности: приближенность найденного решения уравнений движения и неточность параметров движения. Погрешность решения уравнений движения мы будем также называть погрешностью вычислений или погрешностью метода. Говоря о точности теории движения небесного тела, всегда нужно уточнять, включена ли в погрешность теории неточность параметров движения или имеется в виду точность теории в предположении абсолютно точных параметров.

Методы исследований. От других астрономических дисциплин небесная механика отличается лишь методами исследования, среди которых выделяются: *аналитические, численные, качественные.*

Аналитические методы дают возможность получать набор аналитических соотношений, позволяющих рассчитывать приближенные положения и скорости небесных тел на заданные моменты времени, минуя какие-либо промежуточные их значения. Особенностью аналитических методов является большая трудоемкость и нарастающая громоздкость выкладок. Кроме того, аналитические методы не дают возможности судить о свойствах исследуемых движений на очень больших интервалах времени. Другим их недостатком является то, что применимы они не ко всем объектам.

Ограничения, свойственные аналитическим методам, не распространяются на *численные методы*, которые пригодны для расчета движений любых небесных тел и их систем с наперед заданной точностью. С внедрением в научные исследования мощных вычислительных машин считавшаяся прежде чрезмерной трудоемкость численных методов перестала быть препятствием для их применения. Но и у них есть своя ахиллесова пята — это неуклонное накопление погрешности с увеличением интервала интегрирования при невозможности строгих оценок роста этой погрешности. Еще один недостаток этих методов — численная форма представления результатов и неизбежность расчета промежуточных этапов, хотя зачастую целью исследования является конечная конфигурация после интегрирования.

Качественные методы небесной механики позволяют судить о свойствах движений небесных тел без полного интегрирования (аналитического или численного) дифференциальных уравнений.

Аналитические, численные и качественные методы продолжают применяться в современной практической небесной механике, причем красота и высокая эффективность аналитических методов удачно сочетается с простотой и универсальностью методов численных, а все это дополняется космогонической важностью выводов, получаемых качественными методами исследований.

1.5. Общий подход к изучению динамики планет и спутников на основе наблюдений

Общим подходом к изучению динамики планет и спутников является построение модели движения на основе наблюдений. Именно модель движения нужна для практического познания природы.

На рис. 1.1 изображена схема изучения динамики тел Солнечной системы на основе наблюдений. На любом этапе исследований мы фиксируем состав изучаемой системы небесных тел. Установленные на текущий момент законы взаимодействия тел (гравитационное притяжение, сопротивление среды) позволяют записать дифференциальные уравнения движения. Используя аналитические методы, можно найти общее решение уравнений движения. Подставляя в это общее решение значения произвольных постоянных (параметров движения), получим искомую модель движения системы небесных тел. Решая уравнения движения методами численного интегрирования при известных начальных условиях (параметров движения), также получаем модель движения системы небесных тел. Некоторые предварительные значения параметров движения обычно бывают известны из предшествующих исследований. Для построения модели движения потребуются также значения физических параметров, входящих в уравнения движения посредством законов взаимодействия (например, массы тел).

Основным процессом изучения динамики небесных тел является уточнение модели на основе наблюдений. Наблюдения дают нам значения измеряемых величин. Назовем их измеренными значениями. С другой стороны, мы имеем модель движения, которая для того и служит, чтобы предвычислять измеряемые величины. Мы можем вычислить измеряемые величины именно на моменты наблюдений. Результаты называются вычисленными значениями измеряемой величины. Разные по происхождению значения одной и той же величины будут различаться между собой. Эту разность значений мы обозначаем на рис. 1.1 символически через «О-С» (О — *observatum*, С — *calculatum*). Разность естественна, так как в ней присутствует погрешность наблюдений и погрешность модели движения небесного тела. Однако в некоторых случаях разности «О-С» будут превышать погрешность модели и погрешность наблюдений. Новые, более точные наблюдения обнаруживают рассогласование модели с действительностью. В этих случаях рассогласование приписывают наиболее простую и наиболее вероятную причину — неточность принятых значений параметров движения небесного тела. В дело включается процесс, называемый уточнением параметров движения из наблюдений (см. «Методы уточнения параметров» на рис. 1.1). Чаще всего желаемое согласование теории с наблюдениями достигается путем уточнения параметров, и разно-

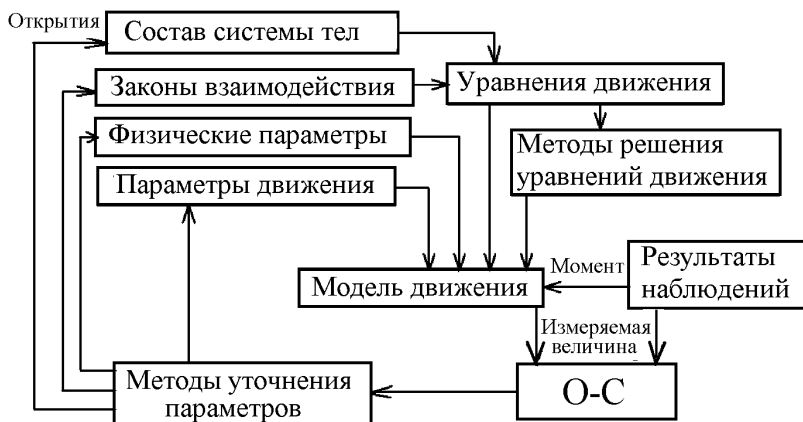


Рис. 1.1. Схема процесса изучения динамики небесных тел.

сти «О-С» снова оказываются в пределах погрешностей модели и наблюдений.

В некоторых редких случаях не удается добиться согласования теории с наблюдениями — разности «О-С» остаются значительными. Тогда приходится совершенствовать методы решения уравнений движения и методы вычислений. Это наиболее трудоемкая часть небесной механики. Заново пересматриваются факторы, влияющие на движение каждого небесного тела. Выводятся новые, более точные формулы теории. Как следствие, формулы становятся более длинными. Разрабатываются и применяются более точные методы вычислений. Как следствие, необходимое вычислительное время существенно увеличивается.

В еще более редких случаях рассогласование теории с наблюдениями остается существенным, сколько ни пытаются исследователи уточнить параметры движения и усовершенствовать модель движения. В результате обобщения фактов, проверки новых гипотез и высшего напряжения интеллекта совершается открытие. Могут быть открыты ранее неизвестные небесные тела или новые законы взаимодействия известных тел. В такой ситуации резко расширяются наши общие представления об окружающем мире. Делается обобщение основных законов природы.

Приведенная здесь схема, как любая схема, суха и ограничена,

она лишь в общем виде отражает разнообразные научные изыскания и накопление фактов, фантазии и ошибки.

Отметим, что описанный процесс имеет также сугубо практическую направленность. Модель движения небесных тел является основой для слежения за возможными опасностями со стороны сил космоса. Модель движения небесных тел также непосредственно используется для проектирования и обеспечения полетов автоматических и пилотируемых околоземных и межпланетных аппаратов — искусственных небесных тел.

1.6. Особые свойства необходимых наблюдений

Движение большинства реальных и воображаемых небесных тел имеет характер обращений одних тел вокруг других. Изучаются также собственные вращения небесных тел. Обращение или вращение тела описывается углом, величина которого монотонно возрастает во времени. Рассмотрим подробнее, как определяются эти процессы из наблюдений.

Угол орбитального обращения или угол вращения небесного тела назовем условно *долготой* и обозначим ее здесь через λ . В большинстве механических моделей скорость изменения долготы $\dot{\lambda}$ приближенно оказывается постоянной.

Прогресс может быть достигнут повышением точности наблюдений. На этом пути может произойти открытие либо нового свойства известного небесного тела, либо новой планеты или спутника. Поясним это на примере.

Допустим, что мы построили хорошую модель движения и с ее помощью вычислили разности значений орбитальной долготы, полученных из наблюдений, и вычисленных по теории, т. е. так называемые невязки «О-С». При наличии ошибок наблюдений график этих разностей может выглядеть так, как показано на рис. 1.2а. Мы видим здесь только «шум» и ничего интересного. Допустим, что прогресс в технике наблюдений позволил улучшить точность наблюдений. Шум уменьшился. На его фоне возникает что-то подозрительное на вид. Это мы видим на рис. 1.2б. При дальнейшем повышении точности наблюдений очевидно наличие некоторого синусоидального изменения разностей «О-С». Смотрите на рис. 1.2в. Этот «сигнал» послужит определению того, чего мы раньше не учли в нашей теории.

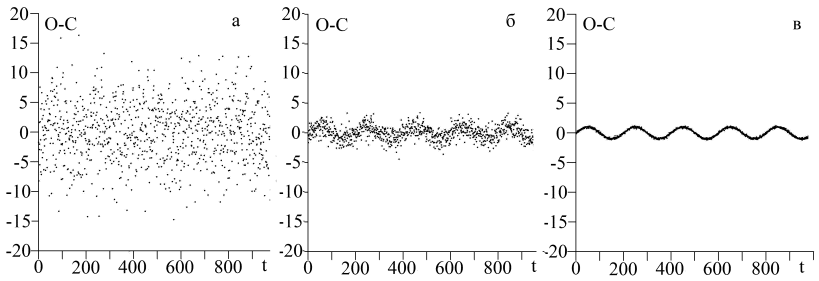


Рис. 1.2. Примеры остаточных отклонений О-С орбитальной долготы небесного тела при различной точности наблюдений.

Свойство орбитальных движений небесных тел таково, что орбитальная долгота увеличивается монотонно со временем. Если исключить из ее значений, полученных из наблюдений, функцию ее теоретического изменения, то можно получить то, что изображено на рис. 1.3а. Снова ничего интересного. Если поискать старые наблюдения и продолжать наблюдать интересующее нас небесное тело, то можно получить то, что показано на рис. 1.3б. Мы видим почти квадратичное по времени изменение долготы. Такой эффект может появиться только из-за неучтенной диссипации механической энергии небесного тела, что может быть вызвано, например, приливными силами.

Теперь ясно, что для прогресса необходимо расширение интервала времени наблюдений. На каком-то этапе это может привести к открытию новых явлений.

Какова же связь интервала времени наблюдений и точности эфемерид? Посмотрим на рис. 1.4а. Показаны значения орбитальной долготы небесного тела, полученные из наблюдений на интервале времени (t_1, t_2) . Налицо некоторый «шум» и линейное изменение. На основе теории и наблюдений мы можем вычислить возможные значения долготы на интересующий нас момент времени t_f , ограниченные прямыми линиями на рисунке. Если мы продолжим наблюдения с прежней точностью до момента t_3 , то точность эфемериды улучшится, что и видно на рис. 1.4б.

Очевидно, что мы не можем измерять орбитальную долготу непосредственно при наблюдениях. Мы наблюдаем лишь проекцию орбитального движения на небесную сферу. Однако можно вывести

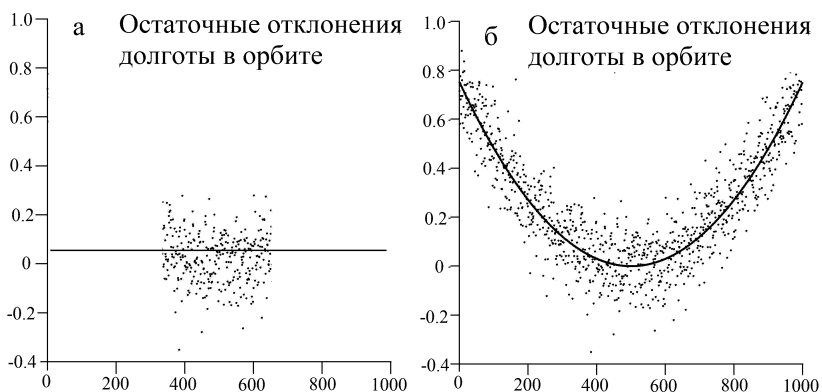


Рис. 1.3. Примеры остаточных отклонений О-С орбитальной долготы небесного тела на различных интервалах времени.

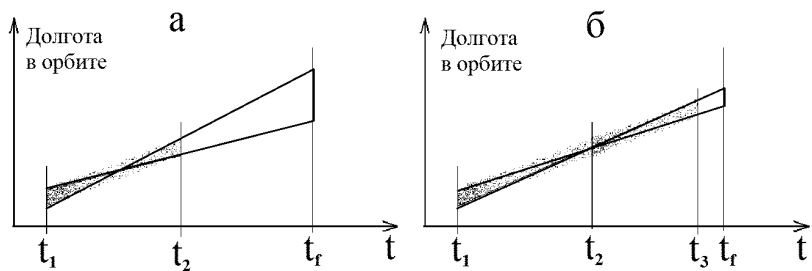


Рис. 1.4. Демонстрация зависимости точности эфемерид небесного тела от интервала времени наблюдений.

приближенную формулу относительно точности определения орбитальной долготы. Аналогичные выводы можно будет сделать и по отношению к другим характеристикам орбитального движения.

Теория рассматриваемого здесь процесса состоит в описании линейного изменения орбитальной долготы небесного тела во времени. Параметром теории движения, определяемым из наблюдений, будет λ . Измеряемой величиной — сама долгота λ . Такие обстоятельства характерны для всех естественных спутников планет.

При выполнении однотипных наблюдений погрешность измерения долготы будет одинаковой в любые моменты времени. Обозначим эту погрешность через σ_λ . Пусть измерение долготы выполне-

но в два момента времени t_1 и t_2 . Тогда погрешность определения параметра движения σ_{λ} находится из соотношения

$$\sigma_{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1},$$

откуда видно, что точность определения параметра движения улучшается с ростом интервала измерений $t_2 - t_1$.

Посмотрим теперь, какова роль точности параметра движения при реализации основной цели теории — предвычисления долготы на заданные моменты времени. Допустим, что нужно вычислить долготу на момент времени t_f в будущем, то есть $t_f > t_2$. Погрешность такого предвычисления определится по формуле

$$\sigma_{\lambda(t_f)} = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_2}{2} \right).$$

Эта погрешность также уменьшается с ростом интервала измерений.

Допустим, что наблюдения продолжались после момента t_2 . Пусть последнее новое наблюдение выполнено в некоторый момент t_3 ($t_3 > t_2$). Теперь погрешность предвычисления долготы на момент t_f стала равной

$$\sigma_{\lambda(t_f)} = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_3 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_3}{2} \right) < \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_2}{2} \right).$$

Таким образом, точность предвычисления долготы улучшилась.

Посмотрим, что может дать привлечение более точных наблюдений, но выполненных на небольшом интервале времени. Пусть, например, посередине интервала измерений $t_1 - t_2$ в моменты t_1^*, t_2^* выполнены два измерения долготы с погрешностью σ_{λ}^* . Пусть при этом

$$\sigma_{\lambda}^* = 0.5 \sigma_{\lambda}, \quad t_2^* - t_1^* = 0.1 (t_2 - t_1), \quad \frac{t_1^* + t_2^*}{2} = \frac{t_1 + t_2}{2},$$

то есть новые наблюдения в два раза точнее прежних, а интервал измерений в десять раз меньше.

Точность предвычисления долготы на основе более точных наблюдений найдется из соотношений

$$\sigma_{\lambda(t_f)} = \frac{\sigma_{\lambda}^*}{t_2^* - t_1^*} \left(t_f - \frac{t_1^* + t_2^*}{2} \right) = 5 \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} \left(t_f - \frac{t_1 + t_2}{2} \right),$$

откуда видно, что эта точность оказалась в пять раз хуже, чем на основе прежних, менее точных наблюдений.

Рассмотренный здесь анализ общих свойств построения модели на основе наблюдений приводит к следующим выводам.

1. Для построения модели движения любого небесного тела всегда стараются использовать набор всех существующих в мире наблюдений, начиная с момента открытия этого небесного тела.

2. Продолжение наблюдений небесных тел даже с прежней точностью оказывается полезным.

3. Использование наблюдений, выполненных с лучшей точностью, не всегда приводит к уточнению модели. Преимущества одних наблюдений по сравнению с другими определяются не только их точностью, но также интервалом времени, на котором они выполнены.

4. Любые новые наблюдения, даже более точные, почти всегда используются только как дополнение к уже существующей базе данных.

Эти выводы составляют особенность практической небесной механики по сравнению с многими другими исследованиями небесных тел, когда новые ценные научные результаты получаются на основе только новейших наблюдений, которые по точности перекрывают старые. В практической небесной механике более точная и более адекватная действительности модель движения небесного тела строится на основе более полной базы данных наблюдений.

Кроме того, очевидна необходимость поиска новых способов наблюдений, представляющих новые данные о движениях небесных тел.