

Н.В.Емельянов

## ПРАКТИЧЕСКАЯ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Оглавление.

Глава 7. Актуальные задачи динамики Солнечной системы.

9.11. Состав, размеры тел и динамика Солнечной системы.

### ВВЕДЕНИЕ

Сознание того, что во все стороны от Земли простирается необъятная Вселенная, всегда беспокоило человека. Это вызывает двойное желание: хочется понять наше место в необозримом пространстве и бесконечном разнообразии мира и одновременно рождается желание извлечь из Космоса выгоду для удовлетворения своих постоянно возрастающих потребностей. У образованного и материально обеспеченного человека нередко возникает некий дискомфорт от отсутствия ответа на подобные вопросы. Еще большее беспокойство испытывает человек, обнаружив угрозу своей жизни со стороны сил природы. Сознание того, что хоть кто-то разбирается в деяниях природы, возвращает нас к привычному комфорту повседневной жизни. Вот почему мы благодарны тем немногим подвижникам науки, которые работают, чтобы избавить нас от мучительных вопросов о Космосе и судьбе.

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. Разум чахнет без новых, необъясненных явлений.

Астрономы и математики давно рассчитали удивительно устойчивый характер движения планет и их спутников. Размеры и формы орбит планет, наклоны осей их вращения почти не изменились даже на астрономических интервалах времени.

На любом этапе познания Вселенной мы уже имеем более или менее адекватную ее модель. Однако новые, более точные наблюдения приводят к рассогласованию модели с действительностью. Желаемое согласование модели восстанавливается путем уточнения известных параметров движения или состояния небесных тел. Процесс невольно направлен на обнаружение новых, необъясненных явлений. На некотором

этапе удастся 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, а хорошо отлаженные процедуры, исправно служащие целям практического познания природы. Одним из главных инструментов на таком пути является небесная механика.

В данной статье кратко рассматривается динамическая модель Солнечной системы. Под динамикой небесных тел мы понимаем свойства действующих на них сил, взаимное расположение и конфигурации траекторий движения, ориентации осей и скорости вращения планет и спутников, формы небесных тел и гравитационные поля ими создаваемые. Для начала рассмотрим строение и размеры Солнечной системы.

## **Состав и размеры Солнечной системы**

Солнечной системой мы называем совокупность объектов, которые расположены в некоторой окрестности Солнца и достаточно долго не покидают эту окрестность. В зависимости от размеров и свойств движения эти небесные тела называются так: Солнце, планеты, спутники планет, кольца планет, малые планеты, кометы, метеорные тела. Малые планеты еще называют астероидами.

Не все тела Солнечной системы видны с Земли даже в самые мощные телескопы. Те, которые не видны, либо слишком малы, либо очень удалены от нас. О существовании некоторых объектов Солнечной системы мы узнали с помощью космических аппаратов, запущенных к другим планетам.

Говоря далее о размерах орбит и самих небесных тел, для удобства запоминания мы будем приводить весьма округленные их значения. С большей точностью об этом можно узнать из литературы, библиография которой приводится в конце статьи.

О литературе на данную тему следует сказать подробнее. Самым первоначальным источником всех данных о динамике Солнечной системы являются публикации научных центров, в которых непосредственно проводятся исследования. В настоящее время такими публикациями

являются "Introduction aux éphémérides astronomiques"[1] и "Explanatory supplement to the astronomical almanac"[2]. В качестве первоисточника данных следует указать "Доклад рабочей группы Международного астрономического союза по картографическим координатам и элементам вращения планет и спутников"[3], который публикуется регулярно один раз в три года. Заметим, что эти публикации являются редкостью даже в научных библиотеках. Более доступным источником данных в настоящее время являются информационные страницы, выставляемые научными институтами в общий доступ через интернет. Адреса основных информационных хранилищ в интернете на рассматриваемую здесь тему мы также приводим в списке литературы [4, 5, 6].

Итак, радиус сферы, в которой находятся наблюдаемые тела Солнечной системы, составляет примерно 8 млрд км ( 8 000 000 000 км ). Для измерения таких больших расстояний астрономы придумали более удобную единицу длины – астрономическую единицу, сокращенно – а.е. Она равна радиусу орбиты Земли. Приблизительно 1 а.е. равна 150 000 000 км. Выраженный в астрономических единицах радиус видимой части Солнечной системы равен 53 а.е.

Снаружи такой сферы еще могут быть тела Солнечной системы, но мы их не видим из-за недостаточных размеров или яркости.

Заметим, что в Солнечной системе нет абсолютно шарообразных тел, нет и круговых орбит. Поэтому нельзя строго определить их радиусы. Мы говорим здесь о радиусах воображаемых окружностей и сфер, пролегающих вблизи соответствующих орбит и поверхностей небесных тел.

Что касается размеров самых главных тел Солнечной системы, то радиус Солнца равен 700 000 км, а радиус Земли – 6 400 км.

В Солнечной Системе все тела движутся. Им это нужно для того, чтобы не упасть на Солнце или планету под действием сил гравитационного притяжения.

Структура Солнечной системы иерархическая – у каждого тела есть главное, вокруг которого оно движется. Следствием такого свойства является то, что траектории большинства тел почти плоские и почти эллиптические или почти круговые.

**Планеты.** Самыми большими телами, после Солнца, являются восемь самых крупных планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. Они движутся по почти круговым орбитам, и все примерно в одной плоскости. В Табл. 1 приводятся размеры восьми больших планет и их средние расстояния от Солнца. Взаимный наклон

среди орбит этих планет не превышает 7 градусов, а максимальный эксцентриситет орбиты составляет 0.2 (орбита Меркурия). Эксцентриситетом  $e$  называют параметр орбиты, который характеризует ее эллиптичность. Большая  $a$  и малая  $b$  полуоси эллипса связаны с его эксцентриситетом  $e$  соотношением  $b = a\sqrt{1 - e^2}$ .

**Таблица 1.** Размеры больших планет и их орбит.

Планета	Радиус планеты	Среднее расстояние от Солнца
Меркурий	2 400 км	0.4 а.е.
Венера	6 000 км	0.7 а.е.
Земля	6 400 км	1.0 а.е.
Марс	3 400 км	1.5 а.е.
Юпитер	70 000 км	5.2 а.е.
Сатурн	60 000 км	9.5 а.е.
Уран	25 000 км	20 а.е.
Нептун	25 000 км	30 а.е.

**Астероиды.** Меньшими по размерам телами Солнечной системы после планет являются астероиды. Их так и называют – малые планеты. По размерам и области движения астероиды делят на группы. Общая особенность орбит астероидов – они могут иметь любые эксцентриситеты и наклоны к плоскости орбиты Земли. В Табл. 2 даются численные характеристики групп астероидов.

**Таблица 2.** Параметры групп астероидов.

Группа астероидов	Средний радиус	Среднее расст. от Солнца	Количество
Главный пояс	< 500 км	2 - 3.5 а.е.	200 000
Троянцы	< 300 км	5.2 а.е.	1 200
Пояс Койпера	100 - 1000 км	30 - 50 а.е.	500
Астероиды, сближающиеся с Землей	< 100 км	0.7 - 4.0 а.е.	300

Отметим некоторые свойства групп астероидов.

Троянцы движутся на орбите Юпитера. Две группы таких астероидов вместе с Юпитером и Солнцем составляют равносторонние треугольники.

Орбиты астероидов, сближающихся с Землей, могут иметь различные большие полуоси и эксцентриситеты, однако траектории пролегают вблизи орбиты Земли.

В области пояса Койпера находится орбита планеты Плутон. До открытия этой группы астероидов Плутон считался девятой планетой Солнечной системы. Однако размеры астероидов пояса Койпера оказались сравнимыми с размером Плутона, орбита Плутона значительно вытянута и наклонена к плоскости орбиты Земли. Это дает основания считать Плутон астероидом номер 0.

Первый астероид был открыт в 19-м веке, в настоящее их открывают более 10 тысяч ежегодно. Сначала астероидам присваивали имена богинь в греческой мифологии. Когда таких имен оказалось недостаточно, астероиды стали называть сначала просто женскими именами, затем именами и фамилиями знаменитых людей, в том числе и астрономов. Закончилась история тем, что имена астероидам присваивать совсем перестали, сохранилась лишь достаточно сложная их нумерация.

Среди астероидов обнаружены двойные, несколько тройных. Ряд астероидов сфотографированы с космических аппаратов. Теперь мы имеем представление об их формах и вращении.

**Кометы.** Это весьма странные небесные тела. Траектории очень вытянуты. Плоскости орбит весьма разнообразны. По физическому составу кометы сильно отличаются от других тел Солнечной системы. За время своего приближения к Солнцу тело кометы подвергается бурному испарению. Частицы кометы под действием силы светового давления отлетают от ядра кометы, образуя живописный "хвост". К настоящему времени известно более 1000 комет.

**Спутники планет.** Самым главным из всех спутников планет является Луна. Она движется вокруг Земли на среднем расстоянии 380 000 км. Радиус Луны равен 1700 км. Ее масса составляет 1/81 часть массы Земли.

В окрестности планет Меркурий и Венера спутников не обнаружено.

Вокруг Марса на почти круговых орбитах в плоскости экватора планеты обращаются два спутника – Фобос и Деймос. Фобос – весьма вытянутое тело, имеющее размеры  $26 \times 22 \times 18$  км. Деймос тоже вытянут, его размеры  $15 \times 12.4 \times 10.8$  км. Радиус орбиты Фобоса – 9 400 км, Деймоса – 23 500 км. Для сравнения напомним, что радиус Марса составляет 3 400 км.

У больших планет Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун открыты мно-

жества спутников, которые можно условно разделить на три группы.

- **Ближние спутники** : круговые орбиты в плоскости экватора планеты на расстояниях 50 000 - 300 000 км от планеты, радиусы спутников 10 - 100 км.
- **Главные спутники** : почти круговые орбиты вблизи плоскости экватора планеты на расстояниях 100 000 - 5 000 000 км от планеты, радиусы спутников 200 - 2 500 км.
- **Далекие спутники** : эксцентриситеты орбит 0.1 - 0.4, наклоны к экватору планеты весьма разнообразные (от 0 до 180 градусов) на расстояниях 5 000 000 - 25 000 000 км от планеты, радиусы спутников 10 - 100 км.

Количество спутников каждой группы у больших планет на 1 августа 2006 г. указано в Табл. 3.

**Таблица 3.** Количество спутников у планет.

Планета	Ближних спутников	Главных спутников	Далеких спутников
Земля	0	1	0
Марс	2	0	0
Юпитер	4	4	54
Сатурн	13	8	35
Уран	13	5	9
Нептун	6	1	6
Плутон	0	1	2

Планета Плутон имеет уникальный спутник Харон. Его радиус всего в два раза меньше радиуса самой планеты. Радиус Плутона – 1200 км, Харона – 600 км. Радиус почти круговой орбиты Харона составляет 20 000 км. Размеры двух других спутников Плутона (Никта и Гидра) установлены весьма приближенно, диаметры не превышают 60 км.

Русскоязычную номенклатуру естественных спутников планет можно найти на сайте

<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/nss/index.htm>

а также по адресу

<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/rw/natsat/index.htm> .

**Кольца планет.** Эти скопления мелких частиц всевозможных размеров формируют кольцевые структуры вращающиеся вокруг Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Плоскости колец всегда совпадают с экватором планеты. Радиусы колец указаны в Табл. 4.

**Таблица 4. Радиусы колец больших планет.**

Планета, кольцо, деление колец	Радиусы (внутренний - внешний) в долях радиуса планеты	Толщина, км
Кольца Юпитера:		
гало	1.3 - 1.71	20 000
главное кольцо	1.71 - 1.81	< 30 км
внутренне паутинное кольцо	1.81 - 2.55	?
внешнее паутинное кольцо	2.55 - 3.15	?
Кольца Сатурна:		
D	1.11	≈ 1 km
C	1.23 - 1.53	≈ 1 km
деление Максвелла		
B	1.53 - 1.95	≈ 1 km
щель Кассини		
A	2.02 - 2.27	≈ 1 km
деление Энке		
F	2.33	≈ 1 km
G	2.8	≈ 1000 km
E	3 - 8	1000 km
Кольца Урана	1.64 - 2.0	?
Кольца Нептуна	2.22 - 2.54	?

Только основные кольца Сатурна D, C, B, A хорошо видны с Земли. Кольца вокруг других планет были обнаружены по фотографиям, сделанным с космических аппаратов.

Кроме рассмотренных выше небесных тел в Солнечной системе движется огромное множество мельчайших частиц – метеорное вещество. Эти частицы попадают в атмосферу Земли и сгорают, образуя ночью на небе эффекты "падающих звезд" и "звездных дождей".

### **Теории и модели орбитального движения тел Солнечной системы**

Необходимая точность модели движения небесного тела определяется точностью его наблюдений. Для разных тел эта точность весьма различна. Если точность описания движения не слишком высока,



можно ограничиться применением законов ньютоновой механики. В отдельных случаях необходимо рассматривать движение тела в рамках релятивистской теории тяготения или общей теории относительности. В этих случаях даже точная запись уравнений движения оказывается чрезвычайно сложной. Поэтому на практике движение тел Солнечной системы изучают в рамках ньютоновой теории тяготения, а при необходимости эффекты общей теории относительности приближенно учитываются введением в рассмотрение небольших поправок в уравнения движения и их решения.

В теории тяготения Ньютона движение небесных тел подчиняется трем известным законам Ньютона и закону всемирного тяготения Ньютона. Однако даже эти законы приводят к необходимости решать дифференциальные уравнения, точное общее решение которых до сих пор не найдено. Поэтому построение теории движения небесных тел заключается в применении всевозможных методов приближенного решения дифференциальных уравнений движения.

Существуют два типа методов решения дифференциальных уравнений движения небесных тел: методы численного интегрирования и аналитические методы. Численное интегрирование состоит в выполнении огромного числа вычислительных операций. Даже на мощных компьютерах это требует много времени. Методы численного интегрирования уравнений движения обеспечивают достаточно высокую точность на весьма ограниченных интервалах времени рассмотрения движения. В ряде задач этой точности оказывается недостаточно.

Аналитические методы более универсальны и точны на больших интервалах времени. Однако они основаны на разложении решения в ряды по степеням некоторых малых параметров. Теории так устроены, что если в формулах положить значения малых параметров равными нулю, то задача станет совсем простой и легко решаемой, но будет весьма приближенно представлять движение небесных тел. Малым параметром в планетной теории является отношение массы возмущающей планеты к массе Солнца. В задаче о движении спутника планеты малым параметром будет отношение расстояния спутник-планета к расстоянию планета-Солнце. В теориях вращения небесных тел существенным является отношение размеров тел к расстоянию между ними. Используются также параметры отличия тел от сферически симметричных, отношение скорости движения одного тела к скорости движения другого.

Для точной теории нужно брать очень много членов из разложения

решения в ряд по степеням малых параметров. Чем меньше значения малых параметров, тем проще и точнее получается теория. Если малые параметры недостаточно малы, то аналитическую теорию движения небесного тела с нужной точностью построить практически невозможно. Успех построения теории движения конкретного небесного тела определяется величиной малых параметров в поставленной задаче.

Методы численного интегрирования требуют огромного количества вычислений. Поэтому в прошлом, когда не было высокопроизводительных компьютеров, применялись только аналитические методы. Однако и сейчас мы не можем ограничиться применением только методов численного интегрирования уравнений движения.

Рассмотрим здесь движение различных конфигураций тел Солнечной системы, рассматриваемых как материальные точки. Такие движения называются орбитальными или поступательными. В качестве упрощенной модели движения почти всегда рассматривается точное решение задачи двух тел – кеплеровское движение. Отличия действующих сил от упрощенной модели называют возмущающими силами, а отличия в самом движении – просто возмущениями.

**Орбитальное движение планет.** Основные возмущения в движении планет обусловлены их взаимным притяжением. Малыми параметрами в теории движения являются отношения масс планет к массе Солнца. Точность наземных астрометрических наблюдений планет достаточно высокая. Для планет земной группы (Меркурий, Венера, Марс) позиционные измерения с высокой точностью выполняются также с помощью радиолокации планет с Земли.

Современные аналитические теории движения планет весьма громоздки и сложны вообще. Имеются также особые проблемы. Трудностью при построении аналитической теории движения Юпитера и Сатурна является приближенный резонанс между орбитальными обращениями этих планет. Особый случай представляет также движение Плутона. Его орбита имеет значительный эксцентриситет (0.25) и большой наклон (18 градусов) к орбите ближайшей и массивной планете Нептун. Это затрудняет построение точной аналитической теории движения.

В прошлом наиболее развитые теории движения планет были построены во Франции учеными Леверье (1855-1874) и Гайо (1912-1915), в Англии Ньюкомом (1898) и Хиллом (1898). Последней самой точной аналитической теорией движения планет является теория, развитая в парижском институте небесной механики Бретаньоном (1982-1988) [7, 8]. Все аналитические теории движения описывают движение вось-

ми больших планет. Хорошей аналитической теории движения Плутона пока не существует.

В последнее время широко применяется численная модель движения планет, созданная и развиваемая в США, в Лаборатории реактивного движения с 1982 года Стендишем [9]. Эта модель основана на всех имеющихся в мире наблюдениях планет. Ее последовательные версии имеют обозначения: DE200, DE403, DE405.

По взаимным возмущениям планет определяются их массы. Для планет, имеющих спутники, более точные определения масс делаются по наблюдениям движения спутников.

**Орбитальное движение астероидов.** Основные возмущения в движении астероидов обусловлены притяжением больших планет. Точность обычных астрометрических наблюдений этих небесных тел достаточно высока. В последние годы сделаны несколько успешных попыток радиолокации астероидов. Для определения точных положений используются также редчайшие случаи видимых покрытий звезд астероидами.

Массы некоторых астероидов оценены по их взаимным возмущениям. В редких случаях изучения этих тел с помощью космических аппаратов удаются более точные определения их масс.

Что касается теории движения в настоящее время в основном применяются численные модели движения астероидов.

Из-за чрезвычайного обилия малых планет в Солнечной системе и большого числа людей, изучающих их динамику, открытия, идентификация и моделирование орбит астероидов координируются в международном центре малых планет (Minor Planet Center – MPC). Общаться с этим центром можно через интернет. Адрес центра в интернете: <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>

**Динамика комет.** Основные возмущения в орбитальном движении комет обусловлены притяжением больших планет. Особенностью динамики комет является действие сил негравитационной природы. К таким силам относятся механическое давление солнечного света и реактивная сила испускания частиц кометы при нагревании ядра кометы Солнцем.

Наблюдения положений комет не может быть сделано с высокой точностью, так как ядро кометы тонет в свете ее хвоста. Глядя на фотографию кометы, трудно указать расположение массивного ядра, которое как раз и определяет ее орбитальное движение.

Движение комет сейчас моделируется в основном численными методами. Для изучения эволюции орбит используются приближенные

аналитические теории движения комет.

**Теория движения Луны.** Две особенности определяют ситуацию с изучением орбитального движения Луны. Первая особенность заключается в сильных возмущениях со стороны Солнца. Это делает неэффективным применение кеплеровской промежуточной орбиты в качестве основы аналитической теории движения. Хилл в 1905 предложил другую приближенную механическую модель, так называемую задачу Хилла, решение которой точнее, чем кеплеровская орбита, описывает движение Луны. Любопытно, что орбита Хилла очень близка по форме к эллипсу, причем центральное притягивающее тело, Земля, расположено не в фокусе, а в центре этого эллипса. Большая ось такой орбиты ориентирована вдоль орбиты Земли. На основе задачи Хилла методами теории возмущений строилась аналитическая теория движения Луны.

Вторая особенность заключается в близости Луны к Земле, следствием является возможность ее высокоточных наблюдений. Особую точность позиционных наблюдений обеспечивают уголкового световые отражатели (зеркала), доставленные на поверхность Луны космическими аппаратами. Начало лазерной светолокации Луны увеличило точность ее позиционных наблюдений в тысячу раз по сравнению с классическими наблюдениями. Это привело в некоторое замешательство теоретиков, которые использовали для моделирования движения Луны аналитические теории, созданные Хиллом, Брауном (1919) и Экертом (1966). В итоге М. Шапрон и Ж.Шапрон (1980 - 1983) [10, 11] построили новую высокоточную аналитическую теорию движения Луны, а в США, в Лаборатории реактивного движения одновременно с развитием численной планетной теории созданы численные модели движения Луны LE200 - LE405 (1982).

**Спутники других планет.** Теории движения естественных спутников планет весьма разнообразны. Разнообразны конфигурации спутниковых систем и возмущающих сил, действующих на их движение. По ситуациям с изучением движения спутников планет их можно разделить на несколько групп.

**Ближние спутники.** Эти спутники движутся по почти круговым орбитам в плоскости экватора планеты. Поскольку большие планеты Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун представляют собой сжатые почти осесимметричные тела, то основные возмущения в движении близких спутников обусловлены динамическим сжатием планеты, то есть "сжатием" гравитационного поля. Этот фактор характеризуется коэффициентами  $J_2, J_4, \dots$  при зональных гармониках разложения силовой функ-

ции притяжения. Движение близких спутников еще подвержено притяжению главных спутников. Это существенный, но второстепенный фактор. Для близких спутников планет пока не нужны очень точные теории, так как точность их наблюдений относительно невысока. Это потому, что при наземных позиционных наблюдениях свет от самой планеты создает в фотокамерах сильный ореол, в котором "тонет" изображение спутника. Что касается близких спутников Сатурна, то их дополнительно засвечивает еще и кольцо планеты. Для близких спутников планет построены и используются простые аналитические теории, основанные на кеплеровской промежуточной орбите и приближенно учитывающие перечисленные выше возмущающие факторы. На практике пока принимают во внимание только вековые возмущения, то есть моделью движения спутника является прецессирующий (поворачивающийся) эллипс. Такой эллипс медленно поворачивается в своей плоскости, а плоскость эта медленно вращается вокруг оси симметрии планеты. Все это при весьма малых эксцентриситетах и наклонах орбит.

**Главные спутники.** Такие спутники имеют орбиты с небольшими эксцентриситетами и расположенные вблизи плоскости экватора планеты. В силу того, что они несколько удалены от планеты и имеют наибольшие размеры среди спутников планет, их легче наблюдать, наблюдения этих спутников более точные, чем других. Поэтому приходится строить довольно точные и сложные аналитические теории движения главных спутников. В таких теориях учитываются сжатие планеты, взаимные возмущения спутников, а также притяжение Солнца. Некоторую трудность создают приближенные резонансы между орбитальными обращениями некоторых главных спутников. В настоящее время наиболее точными теориями являются: теория движения Галилеевых спутников Юпитера Д. Лиске [12], теория движения главных спутников Сатурна А. Вьенна и Л. Дюрье [13], теория движения главных спутников Урана Ж. Ляскара и Р. Якобсона [14]. Все эти теории подробно опубликованы, соответствующие вычислительные программы доступны через интернет.

**Далекие спутники.** Орбиты далеких спутников весьма разнообразны. Эксцентриситеты большинства орбит заключаются в пределах 0.15 - 0.6. Наклоны к плоскости орбиты планеты составляют 20 - 40 градусов, причем движение части далеких спутников по орбитам происходит в том же направлении, что и обращение планеты вокруг Солнца. Другие спутники движутся в обратном направлении. Движение этих спутников подвержено сильному влиянию притяжения Солнца. Поэто-

му построение аналитической теории движения далеких спутников планет весьма затруднительно. Удовлетворительных по точности теорий в настоящее время не существует. Наблюдений далеких спутников планет совсем немного, так как их трудно наблюдать из-за их малой яркости. Точность наблюдений в последнее время получается довольно высокой. С помощью новых мощных телескопов, недавно построенных на международных обсерваториях за последние 5 лет открыто более 50 новых спутников. Для моделирования движения далеких спутников планет используются методы численного интегрирования уравнений движения. В мире существуют только два научных центра, где с необходимой точностью предвычисляется их движение. Это Лаборатория реактивного движения в США (адрес в интернете такой <http://www.jpl.nasa.gov/>) и объединенная группа исследователей ГАИШ МГУ (Н.В.Емельянов) и Института небесной механики и вычисления эфемерид во Франции (адреса в интернете <http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/nss/index.htm> <http://www.imcce.fr/sat> ).

## **Особые случаи орбитального движения спутников планет**

**Со-орбитальные спутники Сатурна.** Среди близких спутников Сатурна два из них, Янус и Эпиметей, движутся на одной и той же орбите синхронно, то есть с одной и той же угловой скоростью. Движение этой пары спутников происходит так, что если представить себе линию, проходящую через центр планеты и вращающуюся с угловой скоростью, равной средней угловой скорости обращения спутников, то спутники отклоняются от этой линии вдоль орбиты периодически с периодом несколько лет и амплитудой, составляющей около 100 градусов для одного спутника и 60 градусов – для другого. Это так называемые либрации спутников относительно движения, соответствующего известному прямолинейному частному решению задачи трех тел. Замечательность явления заключается в том, что по наблюдениях этих либраций можно оценить массы спутников. К сожалению, спутники эти движутся вблизи кольца Сатурна, свет от которого мешает наблюдениям. С Земли спутники видны только несколько дней в моменты видимого исчезновения кольца, когда оно поворачивается к Земле ребром. Это происходит раз в 14 лет.

**Спутники – "Лагранжианы"**. На орбитах двух главных спутников Сатурна движутся еще три со-орбитальных им спутника. Они движутся вблизи треугольных конфигураций, соответствующих известным частным решениям задачи трех тел. Главный спутник Тефия имеет два со-орбитальных – Телесто и Каллипсо, у главного спутника Диона имеется один со-орбитальный – Елена.

**Самый большой эксцентриситет** орбиты (0.7512) среди спутников планет имеет далекий спутник Нептуна – Нереида. Это обстоятельство заставило теоретиков движения Нереиды прибегать к очень хитроумным аналитическим методам.

**Редкие явления в системах спутников планет.** Настоящим подарком природы для ученых являются особые явления в системах спутников планет. Дело в том, что орбиты большинства спутников планет лежат почти в плоскости экватора своей планеты. В некоторые довольно редкие моменты времени плоскости орбит спутников оказываются вблизи направлений от планеты на Солнце и на Землю. При наблюдениях с Земли в такие периоды изображение одного спутника иногда может налагаться на изображение другого спутника в процессе их движения вокруг планеты. Эти явления называют покрытиями. Спутники постоянно освещены Солнцем, но случается, что один из спутников попадает в тень другого. Наступает затмение спутника. В процессе взаимных покрытий и затмений изменяется суммарный блеск двух спутников, участвующих в явлении. Эту величину астрономы давно научились измерять с весьма высокой точностью, и эта точность постоянно возрастает. Обработывая кривые блеска спутников в нескольких явлениях на основе геометрической модели, получают сразу несколько параметров: момент максимального сближения спутников, угловое расстояние между видимыми с Земли центрами спутников и радиусы спутников.

Ценность и необычность наблюдений взаимных покрытий и затмений позволяют называть такие явления событиями. Необычность наблюдений состоит в том, что практически выполняются фотометрические измерения, а в результате получают относительные координаты спутников. Ценность наблюдений событий заключается в их высокой точности и информативности. Точность таких наблюдений составляет сейчас около 0.01 секунды градуса в видимом с Земли положении спутника. Поскольку суммарный блеск в любой момент в процессе явления зависит от радиусов спутников, то имеется возможность определять размеры спутников, а может быть даже их форму.

Вот последовательность некоторых годов событий в системах спут-

ников планет: для Юпитера - 1973, 1979, 1985, 1991, 1997, 2003; для Сатурна - 1980, 1995, 2009; для Урана - 1965, 2008. Подробнее об этих редких явлениях можно прочитать в научно-популярном журнале "Земля и Вселенная" [15].

**Система Плутон-Харон.** Отношение массы спутника к массе планеты, равное 0.15, - максимальное в Солнечной системе. Отношение радиуса планеты к радиусу орбиты спутника также максимальное в Солнечной системе. Эти два небесные тела, как отдельные объекты, наблюдались только с помощью космического телескопа Хаббла. Однако с Земли наблюдались чрезвычайно редкие (раз в 124 года) и интересные явления взаимных покрытий и затмений Плутона и Харона. Орбита Харона располагалась к Земле ребром и в период с 1987 по 1991 год происходили видимые взаимные покрытия и затмения планеты и ее спутника. Суммарная яркость этих небесных объектов в моменты таких явлений уменьшается. Измерения этой яркости позволили определить радиусы этих небесных тел и параметры орбиты спутника. События в системе Плутон-Харон описаны автором настоящей статьи в журнале "Земля и Вселенная" [16].

## Особенности формы и вращений тел Солнечной системы

Свойства вращения небесного тела зависят от гравитационного поля, которое оно само создает, а также от конфигурации и движения других тел. На практике силовую функцию притяжения разлагают в бесконечный ряд по некоторым стандартным функциям, которые называются шаровыми. Коэффициенты разложения уменьшаются от члена к члену, обеспечивая сходимости ряда, и позволяют ограничиться в теории отрезком ряда. Коэффициент  $J_2$  при шаровой функции, которая называется второй зональной гармоникой, определяет сжатие гравитационного поля тела, коэффициент  $J_3$  при третьей зональной гармонике описывает асимметричность поля относительно экваториальной плоскости. Другие коэффициенты характеризуют детали гравитационного поля. Если тело внутри себя почти однородно, то его гравитационное поле определяется формой поверхности. Отношение разности полярного и экваториального размеров планеты к ее экваториальному размеру, то есть сжатие планеты, имеет тот же порядок величины, что и коэффициент  $J_2$ . Ниже мы будем рассматривать параметры вращения и



основные коэффициенты гравитационных полей небесных тел, определяемые их формой.

**Меркурий.** Несферичность тела Меркурия из наблюдений не обнаружена. Про его вращение известно, что ось почти перпендикулярна плоскости орбиты Меркурия. Направление вращения совпадает с направлением орбитального движения Меркурия. Период вращения составляет 54 суток.

**Загадка Венеры.** Про несферичность тела Венеры ничего неизвестно – точности наблюдений для этого недостаточно. Вращается Венера необычно – в обратную сторону относительно орбитального движения. Существует теория (Ласкар и Кореа, 2001) [17], согласно которой такое вращение Венеры является устойчивым и единственно возможным в настоящее время. Математически вопрос остается открытым: была ли Венера от рождения такой? Период ее вращения составляет 243 дня. При построении теории вращения Венеры учитывались следующие факторы: приливные силы со стороны Земли; приливы атмосферы, нагреваемой Солнцем; турбулентное трение на границе ядро-мантия; резонанс между частотой прецессии оси и комбинацией вековых частот орбитального движения; неопределенности в диссипативных моделях.

**Вращение Земли.** Модель вращения Земли построена с высокой точностью на основе наблюдений и с учетом всех известных деталей динамического строения Земли и ее деформаций, а также всех известных возмущающих факторов. В настоящее время ось вращения Земли немного не совпадает ни с главной осью инерции тела Земли, ни с осью эллипсоида, приближенно описывающего ее форму. Ось вращения перемещается в теле Земли – это так называемое движение полюса. Ось вращения медленно поворачивается в пространстве, прецессирует, описывая конус, ось которого перпендикулярна к плоскости орбиты Земли. Ось еще испытывает мелкие колебания, называемые нутацией, обусловленные притяжением Луны и имеющие период, равный периоду ее орбитального движения. Угол наклона оси вращения Земли относительно перпендикуляра к ее орбите составляет 23.5 градуса. Все тот же француз Жак Ласкар в 1993 г. численно моделировал движение и вращение планет на интервале 20 млн лет. Он обнаружил постоянство наклона оси вращения Земли на таких интервалах времени и доказал, что стабильность наклона обусловлена присутствием Луны [18].

Что касается тела Земли, то оно заметно отличается от шара. Основное отличие – сжатие с полюсов. Отношение разности полярного и экваториального размеров Земли к ее экваториальному размеру, то есть

сжатие, составляет примерно 0.003 . Другие детали несферичности существенно меньше.

При изучении вращения Земли и динамики ее искусственных спутников используется разложение силовой функции притяжения в ряд по шаровым функциям. Эти функции нумеруются двумя индексами. Максимальное значение индексов учитываемых членов разложения называется порядком разложения. Гравитационное поле Земли известно настолько точно, что приходится учитывать в разложении до нескольких десятков тысяч шаровых функций. Порядок разложения на практике доходит до 180. Коэффициенты разложения представляют реальное гравитационное поле Земли. Эти коэффициенты определяются из измерений силы тяжести вдоль всей доступной поверхности Земли и из наблюдений движения искусственных спутников. Совокупность значений всех известных коэффициентов разложения силовой функции притяжения Земли называют Стандартной Землей. По мере накопления новых наблюдений коэффициенты переопределяются заново, то есть уточняются. Таким образом появляются все новые версии Стандартной Земли [19, 20].

**Марс.** В настоящее время наклон оси вращения Марса к плоскости его орбиты составляет 25 градусов. Период вращения – 24.6 часа. Наиболее точная модель прецессии-нутаии Марса построена французами Букийон и Суше в 1999 г. [21]. Учитывались все известные возмущающие факторы: притяжение Солнца, притяжение Юпитера и Земли, несферичность Марса, деформации Марса, притяжение Фобоса и Деймоса.

На большом интервале времени (20 млн лет) Ласкар и Робютель в 1993 году исследовали эволюцию наклона оси вращения Марса [22, 23, 24]. Получилось, что на большом интервале времени наклон изменяется сильно и хаотически в пределах от 0 до 60 градусов.

Марс – сжатое тело. Величина сжатия составляет 0.002. Разложение силовой функции притяжения известно до 18 порядка [25]. Известны различия оси симметрии тела, главной оси инерции и оси вращения.

**Вращение больших планет.** Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун являются почти осесимметричными небесными телами. В Табл. 5 приводятся основные параметры гравитационных полей планет и периоды их вращения.

**Таблица 5.** Параметры больших планет.

Планета	Период вращения, час	$J_2$	$J_4$
Юпитер	10	0.01475	-0.000587
Сатурн	10.6	0.01645	-0.000915
Уран	17.25	0.00334	-0.000032
Нептун	16.1	0.00341	-0.00003

Оси вращения Юпитера, Сатурна и Нептуна слегка неперпендикулярны плоскостям орбит планет. Уран "лежит на боку", то есть его ось вращения расположена вблизи плоскости орбиты Урана.

**Вращение Плутона и Харона.** Эта планета и ее спутник – шары. Особенность системы Плутон-Харон заключается в том, что на их вращение не влияют никакие другие тела. Солнце очень далеко. В таких условиях в чистом виде работает так называемая приливная эволюция. Неоднородность гравитационных полей вызывает деформации тел – приливы. При наличии вязкости и вращения тел относительно линии, их соединяющей, приливы не успевают следовать за этой линией и вызывают таким образом торможение вращению. В настоящее время вращение обоих тел происходит синхронно с орбитальным движением Харона. То есть Плутон и Харон все время обращены друг к другу всегда одними и теми же своими сторонами. Период общего вращения – 6.387 сут. Поэтому говорят, что система Плутон-Харон завершила свою приливную эволюцию.

**Вращение двойных астероидов.** Среди астероидов обнаружены двойные. Эти небесные тела имеют самые разные и замысловатые формы. На их вращение влияют другие планеты. Двойные астероиды представляют самый общий случай поступательно-вращательного движения двух твердых тел. Теорию вращения построить очень трудно – чаще всего нет никаких малых параметров.

### **Формы спутников планет и их вращение**

**Физическая либрация Луны.** Из наблюдений довольно хорошо изучена форма Луны. По движению искусственных спутников Луны изучалось ее гравитационное поле. Разложение силовой функции известно с точностью до 4-го порядка [26]. Наблюдаются небольшие повороты Луны относительно направления на Землю – так называемая

физическая либрация Луны. С тех пор, как ее на поверхность были доставлены уголкового отражатели света (зеркала), точность измерений углов поворота Луны стала очень высокой. Все это привело к тому, что в мире несколькими авторами развивается точная теория физической либрации Луны. Это одна из самых громоздких и сложных теорий в небесной механике.

**Другие спутники планет.** Все спутники планет, для которых имеются данные по вращению, вращаются синхронно с орбитальным движением. То есть спутник всегда обращен к своей планете одной и той же стороной. При этом ось вращения перпендикулярна плоскости орбиты, орбита лежит в плоскости экватора планеты, планета сжата с полюсов и осесимметрична. Есть только два исключения из последнего правила: у Марса и Земли имеются небольшие отличия от осесимметричности. Все спутники, кроме двух, вытянуты в направлении к планете. Для многих спутников известны периодические либрации относительно направления на планету.

Два спутника Сатурна Атлас и Телесто - сжатые тела. Оси сжатия перпендикулярны к плоскости орбиты. Спутники вращаются синхронно с орбитальным движением. Экваторы спутников немного вытянуты в направлении к планете.

Среди спутников есть почти шарообразные (с точностью измерений). Это следующие спутники: спутники Юпитера - Ганимед, Каллисто; спутники Сатурна - Диона, Рея, Титан, Япет; спутники Урана - Умбриель, Титания, Оберон; спутник Нептуна - Тритон; спутник Плутона - Харон.

Для ряда спутников форма неизвестна. Это 10 близких малых спутников Урана и 4 близких малых спутников Нептуна. Имеется также ряд спутников, про вращение и форму которых ничего неизвестно.

Размеры и параметры вращения спутников приводятся в работе [3].

## **Особые случаи вращения спутников планет**

**Гиперион (спутник Сатурна).** Этот спутник является сильно вытянутым небесным телом. Его размеры по трем основным осям асимметрии составляют 360 км, 280 км, 224 км. Гиперион пытается ориентироваться своей наибольшей осью к Сатурну. Однако неподалеку от его траектории пролегает орбита очень массивного спутника Титан, ко-

торый, пролетая мимо Гипериона, сильно возмущает его вращение. В итоге, колебания тела Гипериона носят хаотический характер [27].

**Фобос (спутник Марса).** Особое обстоятельство – это хорошая изученность формы и вращения спутника, что предъявляет высокие требования к создаваемой теории его динамики. Тело Фобоса вытянуто всегда в направлении к Марсу. Известна форма спутника по фотографиям, сделанным с космических аппаратов, пролетавших в окрестности Марса. По форме спутника в предположении его внутренней однородности, разработана модель гравитационного поля Фобоса [28]. Эти данные позволили построить теорию либраций спутника. В теории орбитального движения в свою очередь учитываются форма и вращение Фобоса.

**Каллисто (спутник Юпитера).** Из наблюдений с борта космического аппарата следует, что форма спутника сферичная, а гравитационное поле нецентрально из-за неоднородностей внутреннего строения. Вот значения коэффициентов при основных членах разложения гравитационного поля Каллисто:  $J_2 = 0.0000327 \pm 0.0000008$ ,  $C_{22} = 0.0000102 \pm 0.0000003$ ,  $S_{22} = -0.0000011 \pm 0.0000003$ . Эти данные взяты из работы [29]. Из-за такой нецентральности гравитационного поля спутника он всегда ориентирован к Юпитеру одной своей стороной.

**Амальтея (близкий спутник Юпитера).** По фотографиям с космического аппарата определена форма спутника. Построена модель гравитационного поля Амальтеи по ее форме [30]. Имеет место обычное вращение, синхронное орбитальному движению.

## Динамические загадки Солнечной системы

**Загадочные орбитальные ускорения некоторых спутников.** Из-за того, что тела планет и спутников являются вязко-упругими, в них возникают приливы, направленные вдоль линии, соединяющей тела. В процессе вращения и орбитального движения, из-за небольшой вязкости тел приливы слегка запаздывают от линии планета-спутник. Своим несимметричным гравитационным притяжением прилив либо тормозит, либо ускоряет движение. Если планета вращается быстрее, чем орбитальное обращение спутника, как в случае системы Земля-Луна, то вращение планеты замедляется, а в орбитальном движении спутника энергия прирастает, и он передвигается на более высокую орбиту. Если спутник обращается быстрее вращения планеты, как в слу-

чае Фобоса, то картина получается противоположной. То есть вращение планеты ускоряется, а спутник теряет энергию и имеет шанс упасть когда-нибудь на свою планету. При потере энергии по законам небесной механики частота обращения спутника и его линейная скорость возрастают, так что говорят об орбитальном ускорении спутника.

По наблюдаемому орбитальному ускорению Фобоса рассчитано, что примерно через 65 миллионов лет он упадет на Марс. Однако сопоставление модели приливных сил Марса и наблюдаемого ускорения Фобоса приводит к противоречивому результату – приливных сил оказывается недостаточно для объяснения орбитального ускорения.

Аналогичное явление происходит со спутником Юпитера Ио. Она также, как и Фобос приближается к своей планете. Однако это еще более загадочно, поскольку согласно теории приливной эволюции Ио должна удаляться от планеты, а не приближаться, поскольку Юпитер вращается быстрее, чем спутник по своей орбите. Есть только одно предположение – Ио описывает спираль, приближаясь к Юпитеру, больше теряя энергии из-за внутренней диссипации, чем получая энергию от приливов Юпитера [31]. Впрочем, о вязко-упругих свойствах Юпитера абсолютно ничего неизвестно. Еще более загадочным является тело Ио.

**Опоздание Прометей.** История трудного изучения динамики этого спутника такова. Прометей движется вокруг Сатурна совсем по краю его кольца, поэтому виден он с Земли только в короткие периоды (две-три недели), когда кольцо Сатурна ориентируется к нам ребром, оно становится невидимым и не засвечивает окрестности слабого спутника. Это бывает раз в 14 лет. Космические аппараты – редкие гости в окрестности Сатурна. Все же Прометей был открыт в 1980 г.с помощью космического корабля Вояджер-1. В этом же году, когда кольцо в очередной раз "исчезло", его впервые пронаблюдали с Земли. Была определена орбита. Вычислены эфемериды на 1995 год. В течение 14 лет Прометей по объясненным выше причинам не наблюдался с Земли. Когда спустя годы во время видимого исчезновения кольца в 1995 году Прометей увидели с Земли, его планетоцентрическая долгота оказалась на 19 градусов меньше предвычисленной. Однако среднее движение (частота обращения) осталось прежним. Эта загадка вызвала много разных противоречивых предположений. Самое вероятное объяснение состоит в том, что все эти 14 лет Прометей занимался орбитальными либрациями с каким-нибудь со-орбитальным спутником, который до сих пор еще не открыт [32].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Introduction aux éphémérides astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps. Bureau des longitudes. Les éditions de physique. France. 1998.
2. Explanatory supplement to the astronomical almanac. University science books. Mill Valley, California. 1992.
3. Seidelmann P. K. (Shair), Abalakin V.K., Bursa M. et al. Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets and Satellites: 2000. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2002. V. 82. P. 83-111.
4. <http://www.imcce.fr>
5. <http://www.jpl.nasa.gov>
6. <http://lnfm1.sai.msu.ru/neb>
7. Bretagnon P. Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. *Solution VSOP82. Astronomy and Astrophysics*. 1982. V. 114. P. 278.
8. Bretagnon P., Francou G. Planetary theories in rectangular and spherical variables. *VSOP87 solutions. Astronomy and Astrophysics*. 1988. V. 202. P. 309.
9. Standish E. M. The observational basis for JPL's DE200, the planetary ephemerides of the *Astronomical almanac*. *Astronomy and Astrophysics*. 1990. V. 233. P. 252.
10. Chapront-Touzé M. La solution ELP du problème central de la Lune. *Astronomy and Astrophysics*. 1980. V. 83. P. 86.
11. Chapront-Touzé M., Chapront J. The lunar ephemeris ELP 2000. *Astronomy and Astrophysics*. 1983. V. 124. P. 50.
12. Lieske J. H. Theory of motion of Jupiter's Galilean satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 1977. V. 56. P. 333.
13. Vienne A., Duriez L. Ephemeris of the major Saturnian satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 1995. V. 297. P. 588.
14. Laskar J., Jacobson R. A. GUST87. An analytical ephemeris of the Uranian satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 1987. V. 188. P. 212.
15. Емельянов Н. В. Необычные явления в системах спутников планет. *Земля и Вселенная*. 1997. N.3. С.13-20.
16. Емельянов Н. В. Редкие явления в системе Плутона. *Земля и Вселенная*. 1989. N.4. С.27-29.
17. Laskar J., Correia A. *Nature*. 2001. June 14.
18. Laskar J., Joutel F., Robutel P. (1993) Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon. *Nature*. 1993. V. 361. P. 615-617.

19. Стандартная Земля. Под ред. Лундквиста К. и Вейса Г. (перевод с английского). "Мир", М., 1969.
20. Garoschkin E. M. 1973 Smithsonian Standard Earth (III). Smiths. Astrophys. Obs. Special Report N 353. 1973.
21. Bouquillon S., Souchay J. Precise modelling of the precession-nutation of Mars. *Astronomy and Astrophysics*. 1999. V. 345. P.282-297.
22. Laskar J. A numerical experiment on the chaotic behaviour of the solar system *Nature*. 1989. V. 338. P. 237.
23. Laskar J., Robutel P. The chaotic obliquity of the planets *Nature*. 1993. V. 361. N. 6413. P. 608-612.
24. Laskar J. (1994) Large-scale chaos in the solar system *Astronomy and Astrophysics*. 1994. V. 287. N. 1. P. L9-L12
25. Christensen E. J., Balmino G. Development and analysis of a twelfth degree and order gravity model for Mars. *Journal of Geophysical Research*. 1979. V. 84. P. 7943-7953.
26. IERS : 1992. IERS standards (1992). IERS Technical notes. V. 13. Ed. McCarthy D. D. Observatoires de Paris.
27. Klavetter J. J. The Chaotic Rotation of Hyperion. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1989. V. 21. P. 983.
28. Сагитов М.У., Таджидинов Х.Т., Михайлов Б.О. Модель гравитационного поля Фобоса. *Астрономический вестник*, 1981, т. 15, с. 142-152.
29. Anderson J. D., Jacobson R. A., McElrath T. P., Moore W. B., Schubert G., and Thomas P. C. Shape, Mean Radius, Gravity Field, and Interior Structure of Callisto. 2001. *Icarus*. V. 153. P. 157-161.
30. Gozdziewski K., Maciejewski A. J., Stooke P. J. A model of the gravitational field of Amalthea. Part 1: Derivation. *Earth, Moon, and Planets*. 1994. V. 64. N. 3. P. 243-264.
31. Aksnes K., and Franklin F. A. Secular Acceleration of Io Derived from Mutual Satellite Events *The Astronomical Journal*. 2001. V. 122. N. 5. P. 2734-2739.
32. French R. G., Hall K. J., MCGhee C. A., Nicholson P. D., Cuzzi J., Dones L., Lissauer J. The Peregrinations of Prometheus. *American Astronomical Society, DDA meeting N 30, N 02.04*. 1998. V. 30. P. 1141.