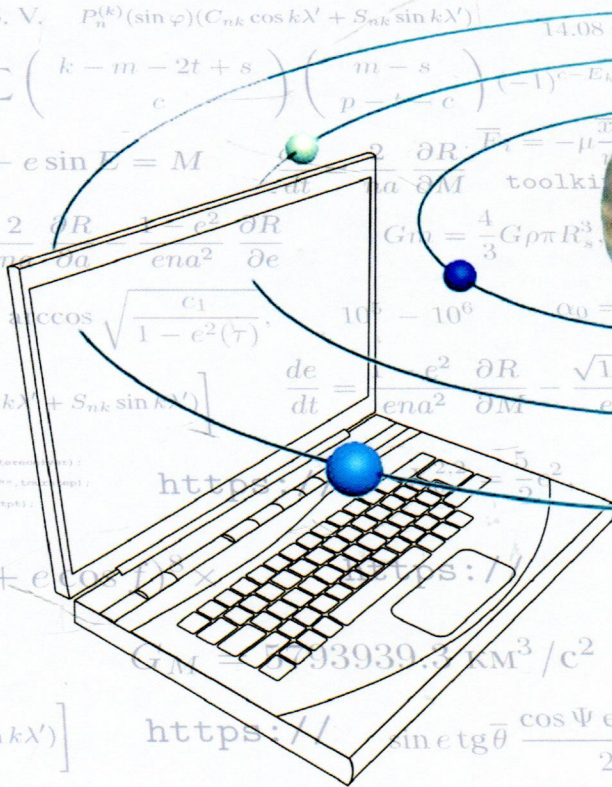




Н. В. Емельянов

# Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений



Московский государственный университет  
имени М. В. Ломоносова  
Государственный астрономический институт  
имени П. К. Штернберга

Н. В. Емельянов

**ДИНАМИКА  
ЕСТЕСТВЕННЫХ  
СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ  
НА ОСНОВЕ  
НАБЛЮДЕНИЙ**



Фрязино  
2019

УДК 521.1+523.4

ББК 22.62

Е 60



Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 19-12-00005, не подлежит продаже.

**Е 60 Емельянов Н. В.**

Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений.

— Фрязино: Век 2. 2019. — 576 с.

ISBN 978-5-85099-199-9

Представлен обширный набор методов и результатов изучения движения естественных спутников планет. Основное внимание уделено задаче уточнения параметров движения спутников на основе наблюдений. Дается множество фактических сведений об орбитах и физических свойствах естественных спутников больших планет Солнечной системы. Главы книги снабжены обширной библиографией работ, на которых основаны представленные в книге сведения.

Материал, изложенный в книге, предназначен для исследователей в широкой области динамики Солнечной системы, для специалистов, осуществляющих проекты по подготовке миссий к другим планетам. Книга предназначена также для использования в учебном процессе в классических университетах.

Она будет полезна и популяризаторам науки.

ББК 22.62

**Emelyanov N. V.**

The dynamics of natural satellites of the planets based on observations.

An extensive set of study methods and results on the motion of natural satellites of the planets is presented. The main attention is paid to the problem of determining the parameters of satellite motion from observations. A lot of factual information about orbits and physical properties of the natural satellites is given. The chapters of the book are provided with an extensive bibliography of papers on which the presented information is based.

The material presented in the book is intended for researchers in the wide field of the dynamics of the solar system, for professionals implementing mission projects preparation to other planets. The book is also intended for use in the educational process in classical universities. It will be useful for popularizers of science as well.

ISBN 978-5-85099-199-9

© Н. В. Емельянов, текст, илл.

© Век 2, 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие автора</b>	<b>12</b>
<b>Глава 1. Цели, задачи и общий подход к изучению динамики спутников</b>	<b>15</b>
1.1. Введение . . . . .	15
1.2. Небесная механика — основа изучения динамики спутников планет . . . . .	17
1.3. Цели изучения динамики спутников планет . . . . .	18
1.4. Основные понятия небесной механики и астрометрии	19
1.5. Общий подход к изучению динамики планет и спутников . . . . .	25
1.6. Особые свойства необходимых наблюдений . . . . .	28
<b>Глава 2. Спутники планет</b>	<b>33</b>
2.1. Спутники планет — объекты Солнечной системы . . . . .	34
2.2. Классификация и номенклатура спутников планет . . . . .	35
2.3. Открытие Нептуна и его спутника Тритона . . . . .	39
2.4. История открытия спутника Плутона Харона . . . . .	41
2.5. Орбитальные и физические параметры планет . . . . .	49
2.6. Орбитальные параметры спутников планет . . . . .	53
Литература к Главе 2 . . . . .	55
<b>Глава 3. Уравнения движения и аналитические теории</b>	<b>59</b>
3.1. Уравнения движения и системы координат . . . . .	60
3.2. Модель кеплеровского движения . . . . .	63
3.2.1. Основные формулы кеплеровского движения . . . . .	63
3.2.2. Вычисление координат в эллиптическом кеплеровском движении . . . . .	71
3.2.3. Вычисление скорости в эллиптическом кеплеровском движении . . . . .	71

3.2.4.	Частные производные от координат и компонент скорости . . . . .	71
3.2.5.	Формулы кеплеровского движения относительно элементов Лагранжа . . . . .	74
3.2.6.	Примеры использования элементов Лагранжа . . . . .	77
3.3.	Силовая функция притяжения несферичной планеты . . . . .	77
3.3.1.	Разложение силовой функции . . . . .	77
3.3.2.	Притяжение в моделях и для реальных тел . . . . .	79
3.4.	Приближенный учет влияния главных спутников на движение далеких . . . . .	83
3.5.	Подходы и методы построения моделей движения . . . . .	84
3.6.	Обобщенная задача двух неподвижных центров . . . . .	87
3.7.	Методы теории возмущений . . . . .	90
3.7.1.	Общая схема теории возмущений . . . . .	90
3.7.2.	Применение методов теории возмущений . . . . .	92
3.7.3.	Уравнения относительно элементов промежуточной орбиты . . . . .	98
3.7.4.	Решение уравнений методом малого параметра . . . . .	105
3.7.5.	Решение уравнений способом Пуассона . . . . .	109
3.8.	Разложение возмущающей функции относительно элементов промежуточной орбиты . . . . .	112
3.9.	Определение возмущений . . . . .	117
3.10.	Постоянное возмущение большой полуоси . . . . .	123
3.11.	Прецессирующий эллипс . . . . .	127
3.12.	Возмущенное движение при малых эксцентриситетах . . . . .	129
3.12.1.	Формулировка проблемы . . . . .	129
3.12.2.	Круговое возмущенное движение . . . . .	130
3.12.3.	Переход к элементам кеплеровской орбиты . . . . .	132
3.12.4.	Оскулирующие элементы в возмущенном движении при малых эксцентриситетах . . . . .	135
3.13.	Построенные аналитические теории движения спутников планет . . . . .	142
3.13.1.	Аналитическая теория движения Тритона . . . . .	142
3.13.2.	Модели прецессирующих эллипсов для близких спутников Юпитера . . . . .	149
3.13.3.	Специальные аналитические теории главных спутников больших планет . . . . .	152
3.14.	Влияние приливов в вязко-упругих телах планеты и спутника . . . . .	155

3.14.1. Постановка задачи о влиянии приливов . . . . .	155
3.14.2. Уравнения в прямоугольных координатах . . . . .	157
3.14.3. Решение уравнений в прямоугольных координатах . . . . .	160
3.14.4. Переход к элементам кеплеровской орбиты . . . . .	164
3.14.5. Некоторые важные выводы . . . . .	176
Литература к Главе 3 . . . . .	178
<b>Глава 4. Методы численного интегрирования</b>	<b>183</b>
4.1. Цели решения уравнений движения небесных тел . . . . .	184
4.2. Общие свойства методов численного интегрирования . . . . .	185
4.3. Метод Рунге-Кутты . . . . .	190
4.4. Алгоритм решения задач методами численного интегрирования . . . . .	192
4.5. Инструкция к программе Эверхарта . . . . .	194
4.6. Программа интегрирования М.В. Беликова . . . . .	200
4.7. Сравнение процедур численного интегрирования . . . . .	202
4.8. Аппроксимация рядами по полиномам Чебышева . . . . .	202
4.9. Обзор методов. Книга А.В.Авдюшева . . . . .	205
Литература к Главе 4 . . . . .	206
<b>Глава 5. Наблюдения спутников планет</b>	<b>208</b>
5.1. Общие принципы наблюдений . . . . .	208
5.2. Определение топоцентрических положений . . . . .	210
5.3. Наблюдения планеты . . . . .	211
5.4. Наблюдения спутника планеты . . . . .	214
5.5. Наблюдения двух спутников планеты . . . . .	215
5.6. Определение угловых измеряемых величин . . . . .	217
5.7. Угловое расстояние и позиционный угол . . . . .	220
5.8. Определение тангенциальных координат . . . . .	221
5.9. Определение разности координат в случае наблюдений взаимных затмений спутников . . . . .	222
5.10. Заключение относительно измеряемых величин . . . . .	225
5.11. Моменты видимых сближений спутников . . . . .	225
5.12. Средства и техника наземных наблюдений . . . . .	228
5.13. Источники данных наблюдений . . . . .	231
5.14. Шкалы времени и системы координат . . . . .	233
Литература к Главе 5 . . . . .	239

<b>Глава 6. Построение моделей движения небесных тел на основе наблюдений</b>	<b>241</b>
6.1. Метод дифференциального уточнения параметров. Применение МНК . . . . .	242
6.2. Плохая обусловленность и неоднозначность решения . . . . .	254
6.3. Обзор сведений об алгоритмах фильтрации . . . . .	257
6.4. Вычисление измеряемых величин и частных производных . . . . .	259
6.4.1. Общий порядок вычислений . . . . .	259
6.4.2. Дифференциальные уравнения для изохронных производных в задаче трех тел . . . . .	263
6.4.3. Дифференциальные уравнения для изохронных производных. Уточнение массы возмущающего тела . . . . .	266
6.4.4. Дифференциальные уравнения для изохронных производных в задаче о движении спутника сжатой планеты . . . . .	267
6.4.5. Построение условных уравнений при угловых измерениях . . . . .	270
6.5. Назначение весов наблюдениям . . . . .	275
6.6. Вычисление статистических характеристик невязок . . . . .	278
6.7. Проблема отбраковки грубых наблюдений . . . . .	280
Литература к Главе 6 . . . . .	281
<b>Глава 7. Получение астрометрических данных из наблюдений взаимных покрытий и затмений спутников планет</b>	<b>282</b>
7.1. Описание явлений . . . . .	283
7.2. Метод получения астрометрических данных . . . . .	286
7.3. Упрощенный вариант модели . . . . .	290
7.4. Фотометрические модели явлений . . . . .	293
7.4.1. Общие фотометрические характеристики . . . . .	293
7.4.2. Фотометрическая модель взаимного покрытия спутников . . . . .	295
7.4.3. Фотометрическая модель взаимного затмения спутников . . . . .	297
7.5. Законы рассеяния света для спутников планет . . . . .	299
7.5.1. Закон рассеяния света Ломмеля–Зеелигера . . . . .	299
7.5.2. Закон Хапке для гладкой поверхности . . . . .	300
7.5.3. Закон Хапке для шероховатой поверхности . . . . .	301

7.5.4.	Параметры закона Хапке для Галилеевых спутников Юпитера . . . . .	302
7.6.	Фотометрические характеристики спутника, интегральные по диску . . . . .	303
7.7.	Фотометрические модели взаимных покрытий и затмений главных спутников Сатурна и Урана . . . . .	306
7.7.1.	Фотометрическая модель спутников Сатурна . . . . .	306
7.7.2.	Фотометрическая модель для спутников Урана . . . . .	311
7.8.	Соотношение точности наблюдений различных типов . . . . .	312
7.9.	Всемирные кампании наблюдений . . . . .	313
7.10.	Препятствия перед улучшением точности . . . . .	313
7.11.	Периоды явлений в будущем . . . . .	320
	Литература к Главе 7 . . . . .	321
<b>Глава 8.</b>	<b>Оценка точности эфемерид спутников планет</b>	<b>326</b>
8.1.	Факторы, определяющие точность эфемерид . . . . .	327
8.2.	Вариация ошибок наблюдений методом Монте-Карло . . . . .	329
8.3.	Вариация состава наблюдений «бутстреп»-выборками . . . . .	332
8.4.	Оценка точности методом вариации параметров . . . . .	335
8.5.	Точность эфемерид далеких спутников . . . . .	337
	Литература к Главе 8 . . . . .	342
<b>Глава 9.</b>	<b>Вращение спутников планет</b>	<b>344</b>
9.1.	Общие свойства вращения спутников планет . . . . .	344
9.2.	Основные понятия о вращении планет и спутников . . . . .	347
9.3.	Вращение Нептуна и орбита Тритона . . . . .	349
9.4.	Теория вращения Фобоса . . . . .	353
9.5.	Вращение Галилеевых спутников Юпитера, спутников Сатурна и Плутона . . . . .	357
9.6.	Хаотическое вращение спутников планет. Вращение Гипериона . . . . .	359
	Литература к Главе 9 . . . . .	366
<b>Глава 10.</b>	<b>Эволюция орбит спутников планет</b>	<b>370</b>
10.1.	Воздействие различных факторов на эволюцию орбит спутников планет . . . . .	371
10.2.	Эволюция орбит спутников от сжатия планеты . . . . .	372
10.3.	Эволюция орбит спутников планет под действием притяжения Солнца . . . . .	376
10.3.1.	Осреднение возмущающей функции . . . . .	376
10.3.2.	Частный случай — задача Хилла . . . . .	381



10.3.3.	Анализ при дважды осредненной возмущающей функции в случае Хилла . . . . .	382
10.3.4.	Эволюция при дважды осредненной возмущающей функции в случае Хилла . . . . .	392
10.3.5.	Применения для реальных спутников планет . . . . .	400
10.4.	Уточненные модели эволюции. Численно-аналитический метод . . . . .	401
10.5.	Эволюция орбит при совместном влиянии различных факторов . . . . .	405
10.6.	Классификация орбит спутников по свойствам эволюции орбит . . . . .	409
10.7.	Эволюция орбит и сближения далеких спутников . . . . .	411
10.7.1.	Современные знания об эволюции орбит далеких спутников планет . . . . .	411
10.7.2.	Сближения далеких спутников планет . . . . .	415
10.7.3.	Аналитическое описание эволюции орбит . . . . .	416
10.7.4.	Определение минимальных расстояний между орбитами . . . . .	417
10.7.5.	Интернет-ресурс по эволюции орбит и сближений далеких спутников . . . . .	419
10.7.6.	Примеры вычислений . . . . .	420
10.7.7.	Заключение . . . . .	423
10.8.	Уточнение теории вековых возмущений Лапласа – Лагранжа . . . . .	424
	Литература к Главе 10 . . . . .	425
<b>Глава 11.</b>	<b>Физические параметры спутников планет</b>	<b>432</b>
11.1.	Введение . . . . .	433
11.2.	Справочник по физическим параметрам спутников . . . . .	434
11.3.	Детектирование вулканов на спутнике Юпитера Ио . . . . .	435
11.4.	Оценки физических параметров далеких спутников планет . . . . .	436
11.4.1.	Особенности далеких спутников планет . . . . .	436
11.4.2.	Обзор имеющихся фотометрических данных . . . . .	438
11.4.3.	Фотометрическая модель для далеких спутников . . . . .	442
11.4.4.	Определение фотометрических параметров по результатам фотометрии . . . . .	444
11.4.5.	Исходные данные и результаты . . . . .	446
11.4.6.	Сравнение результатов разных авторов . . . . .	450

11.4.7. Выводы об оценках фотометрических параметров . . . . .	453
11.5. Определение массы Гималии по астрометрическим наблюдениям . . . . .	454
Литература к Главе 11 . . . . .	459
<b>Глава 12. Информационные ресурсы по естественным спутникам планет</b>	<b>464</b>
12.1. Варианты и смена версий теорий движения . . . . .	465
12.2. Доступ к базам данных и эфемеридам спутников . . . . .	468
12.3. Возможности сервера эфемерид MULTI-SAT . . . . .	475
12.4. Теории и модели в сервере эфемерид MULTI-SAT . . . . .	481
12.5. Теории и модели в сервере эфемерид JPL . . . . .	486
12.6. Спутники планет в виртуальных обсерваториях . . . . .	488
12.7. Стандарты фундаментальной астрономии . . . . .	488
Литература к Главе 12 . . . . .	491
<b>Приложение 1. Номенклатура спутников планет</b>	<b>495</b>
<b>Приложение 2. Орбитальные параметры спутников</b>	<b>510</b>
<b>Приложение 3. Специальные функции в небесной механике</b>	<b>524</b>
<b>Приложение 4. Шкалы времени</b>	<b>530</b>
<b>Приложение 5. Декомпозиция Холецкого. Программа</b>	<b>536</b>
<b>Приложение 6. Параметры вращения планет и спутников</b>	<b>538</b>
<b>Приложение 7. Физические параметры спутников планет</b>	<b>556</b>
<b>Предметный указатель</b>	<b>572</b>