

К. Мюррей, С. Дермотт

# ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

*Перевод с английского под редакцией  
д. ф.-м. н. И. И. Шевченко*



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2009

51404

# SOLAR SYSTEM DYNAMICS

CARL D. MURRAY

Queen Mary and Westfield College,  
University of London

STANLEY F. DERMOTT

University of Florida, Gainesville



CAMBRIDGE  
UNIVERSITY PRESS

УДК 22.65  
ББК 521, 523.1  
М 98



Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 07-02-07029

Мюррей К., Дермотт С. **Динамика Солнечной системы** / Пер. с англ. под ред. И.И. Шевченко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 588 с. — ISBN 978-5-9221-1121-8.

Книга известных специалистов в области небесной механики К. Мюррея (Великобритания) и С. Дермотта (США) посвящена важнейшему разделу небесной механики — динамике тел Солнечной системы. Сегодня эта наука преобразилась благодаря исследованиям Солнечной системы с помощью космических аппаратов, невероятному развитию наземных и космических средств наблюдательной астрономии, прогрессу вычислительной техники и программных средств, скачку в развитии теории. Книга представляет собой современную научную монографию, весьма полно описывающую различные аспекты проблем динамики тел Солнечной системы. По полноте и современному уровню изложения предмета она не имеет аналогов на русском языке.

Монография предназначена научным работникам, специализирующимся в области небесной механики и динамики тел Солнечной системы, теоретической механики, нелинейной динамики и теории динамического хаоса, а также студентам и аспирантам университетов.

---

Научное издание

*МЮРРЕЙ Карл*  
*ДЕРМОТТ Стэнли*

## **ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

Редактор *Е.Ю. Меренкова*  
Редактор-организатор *Т.Ю. Давидовская*  
Оригинал-макет: *И.Г. Андреева*  
Оформление переплета: *Д.Б. Белуха*

Подписано в печать 27.05.09. Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 47,8. Уч.-изд. л. 47,7. Тираж 300 экз. Заказ № 682

Издательская фирма «Физико-математическая литература»  
МАИК «Наука/Интерпериодика»  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90  
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;  
http://www.fml.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ООО «Чебоксарская типография № 1»  
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15



---

ISBN 978-5-9221-1121-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2009

© К. Мюррей, С. Дермотт, 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора перевода .....	13
Предисловие к русскому изданию .....	16
Предисловие .....	17
<b>Глава 1. Строение Солнечной системы.</b> .....	<b>20</b>
1.1. Введение .....	20
1.2. Вера в число .....	21
1.3. Кеплеровы законы движения планет .....	22
1.4. Закон всемирного тяготения Ньютона .....	23
1.5. «Закон» Тициуса–Боде .....	24
1.6. Резонансы в Солнечной системе .....	28
1.6.1. Планетная система (29). 1.6.2. Система Юпитера (29). 1.6.3. Система Сатурна (30). 1.6.4. Система Урана (31). 1.6.5. Система Нептуна (32). 1.6.6. Система Плутона (32). 1.6.7. Пояс астероидов (32). 1.6.8. Кометы, метеороиды и пыль (33).	
1.7. Тенденция к соизмеримости .....	33
1.8. Последние достижения .....	36
Контрольные упражнения .....	38
<b>Глава 2. Задача двух тел.</b> .....	<b>41</b>
2.1. Введение .....	41
2.2. Уравнения движения .....	41
2.3. Положение и скорость на орбите .....	44
2.4. Средняя и эксцентрическая аномалии .....	49
2.5. Разложения в эллиптическом движении .....	56
2.6. Приближение ведущего центра .....	60
2.7. Барикентрические орбиты .....	63
2.8. Орбита в пространстве .....	66

2.9. Возмущенные орбиты . . . . .	71
2.10. Гамильтонова формулировка . . . . .	75
Контрольные упражнения . . . . .	78
<b>Глава 3. Ограниченная задача трех тел . . . . .</b>	<b>80</b>
3.1. Введение . . . . .	80
3.2. Уравнения движения . . . . .	81
3.3. Интеграл Якоби . . . . .	84
3.4. Соотношение Тиссерана . . . . .	88
3.5. Лагранжевы точки либрации . . . . .	90
3.6. Положение точек либрации . . . . .	93
3.7. Устойчивость точек либрации . . . . .	99
3.7.1. Коллинеарные точки (105). 3.7.2. Треугольные точки (107).	
3.8. Движение вблизи $L_4$ и $L_5$ . . . . .	110
3.9. Орбиты типа «головастик» и «подкова» . . . . .	112
3.10. Кривые нулевой скорости и орбиты . . . . .	116
3.11. Астеронды-тройцы и спутники-тройцы . . . . .	121
3.12. Янус и Эпиметей . . . . .	124
3.13. Уравнения Хилла . . . . .	129
3.14. Эффекты сопротивления . . . . .	134
3.14.1. Анализ константы Якоби (136). 3.14.2. Линейная устойчивость точек $L_4$ и $L_5$ (137). 3.14.3. Инерционные силы сопротивления (139).	
Контрольные упражнения . . . . .	141
<b>Глава 4. Приливы, вращение и форма . . . . .</b>	<b>143</b>
4.1. Введение . . . . .	143
4.2. Приливный горб . . . . .	144
4.3. Теория потенциала . . . . .	148
4.4. Приливая деформация . . . . .	153
4.5. Вращательная деформация . . . . .	161
4.6. Соотношение Дарвина–Радо . . . . .	165
4.7. Фигура и внутреннее строение спутников . . . . .	167
4.8. Зона Роша . . . . .	170
4.9. Приливные моменты сил . . . . .	172
4.10. Спутниковые приливы . . . . .	179
4.11. Приливный разогрев Ио . . . . .	186

4.12. Приливы на Титане . . . . .	188
4.13. Приливная эволюция . . . . .	191
4.14. Двойное синхронное состояние . . . . .	196
Контрольные упражнения . . . . .	199
<b>Глава 5. Спин-орбитальное взаимодействие . . . . .</b>	<b>202</b>
5.1. Введение . . . . .	202
5.2. Приливное замедление вращения . . . . .	202
5.3. Постоянный квадрупольный момент . . . . .	207
5.4. Спин-орбитальный резонанс . . . . .	213
5.5. Захват в резонанс . . . . .	222
5.6. Вынужденные либрации . . . . .	228
5.7. Поверхность сечения . . . . .	229
Контрольные упражнения . . . . .	234
<b>Глава 6. Возмущающая функция . . . . .</b>	<b>237</b>
6.1. Введение . . . . .	237
6.2. Возмущающая функция . . . . .	238
6.3. Разложение по многочленам Лежандра . . . . .	240
6.4. Буквенное разложение по элементам орбиты . . . . .	245
6.5. Буквенное разложение второго порядка . . . . .	249
6.6. Члены, ассоциированные с заданным аргументом . . . . .	258
6.7. Применение возмущающей функции . . . . .	261
6.8. Планетные уравнения Лагранжа . . . . .	263
6.9. Классификация аргументов в возмущающей функции . . . . .	265
6.9.1. Вековые члены (266). 6.9.2. Резонансные члены (269). 6.9.3. Ко-	
роткопериодические и низкоамплитудные члены (272).	
6.10. Примеры вычисления усредненной возмущающей функции . . . . .	273
6.10.1. Члены, соответствующие соизмеримости 3:1 (273). 6.10.2. Члены,	
соответствующие соизмеримости 18:7 (275).	
6.11. Эффект сжатия планеты . . . . .	277
Контрольные упражнения . . . . .	282
<b>Глава 7. Вековые возмущения . . . . .</b>	<b>286</b>
7.1. Введение . . . . .	286
7.2. Вековые возмущения в случае двух планет . . . . .	286
7.3. Юпитер и Сатурн . . . . .	292

7.4. Свободные и вынужденные элементы . . . . .	295
7.5. Юпитер, Сатурн и пробная частица . . . . .	301
7.6. Метод усреднения Гаусса . . . . .	305
7.7. Вековые возмущения в более общем случае . . . . .	310
7.8. Вековая теория для Солнечной системы . . . . .	313
7.9. Обобщенные свободные и вынужденные элементы . . . . .	317
7.10. Семейства Хираямы и пылевые комплексы IRAS . . . . .	320
7.11. Вековой резонанс . . . . .	324
7.12. Вековая теория высоких порядков . . . . .	327
Контрольные упражнения . . . . .	327
<b>Глава 8. Резонансные возмущения . . . . .</b>	<b>330</b>
8.1. Введение . . . . .	330
8.2. Геометрия резонанса . . . . .	330
8.3. Физика резонанса . . . . .	335
8.4. Изменения элементов орбиты . . . . .	337
8.5. Резонанс в круговой ограниченной задаче трех тел . . . . .	340
8.6. Модель маятника . . . . .	343
8.7. Ширина зоны либраций . . . . .	346
8.8. Гамильтонов подход . . . . .	350
8.8.1. $e$ -резонанс и $e'$ -резонанс (357). 8.8.2. $e^2$ -, $e'^2$ -, $I^2$ - и $I'^2$ -резонансы (364). 8.8.3. $e^3$ -резонанс и $e'^3$ -резонанс (366). 8.8.4. $ee'$ -резонанс и $II'$ -резонанс (368).	
8.9. Резонанс 2:1 . . . . .	373
8.9.1. Точный резонанс (374). 8.9.2. Либрация с умеренной амплитудой (374). 8.9.3. Либрация с большой амплитудой (376). 8.9.4. Апоцентрическая либрация (376). 8.9.5. Внутренняя циркуляция (377). 8.9.6. Внешняя циркуляция (377). 8.9.7. Другие типы движения (377). 8.9.8. Сопоставление с аналитической теорией (378).	
8.10. Резонансы 3:1 и 7:4 . . . . .	379
8.11. Дополнительные резонансы и расщепление резонансов . . . . .	381
8.12. Прохождение через резонансы . . . . .	383
8.12.1. Столкновения с резонансами первого порядка (384). 8.12.2. Столкновения с резонансами второго порядка (390).	
8.13. Динамика захвата в резонанс и эволюция в резонансе . . . . .	392
8.14. Двухтельные резонансы в Солнечной системе . . . . .	395
8.14.1. Резонанс в системе Титан–Гиперион (395). 8.14.2. Резонанс в системе Мимас–Тефия (396).	

8.15. Столкновения с резонансами в спутниковых системах . . . . .	398
8.16. Трехтельный резонанс. . . . .	401
8.17. Резонанс Лапласа . . . . .	403
8.18. Вековые и резонансные движения . . . . .	407
8.19. LONGSTOP Uranus. . . . .	410
8.20. Планеты у пульсаров. . . . .	412
Контрольные упражнения . . . . .	414
<b>Глава 9. Хаос и долговременная эволюция . . . . .</b>	<b>416</b>
9.1. Введение. . . . .	416
9.2. Существенная зависимость от начальных условий . . . . .	417
9.3. Регулярные и хаотические орбиты . . . . .	420
9.3.1. Сечение Пуанкаре (420).   9.3.2. Регулярные орбиты (422).	
9.3.3. Хаотические орбиты (423). 9.3.4. Характеристические показатели	
Ляпунова (424).	
9.4. Хаос в круговой ограниченной задаче трех тел . . . . .	427
9.5. Алгебраические отображения . . . . .	432
9.5.1. Стандартное отображение (433). 9.5.2. Резонансные отображе-	
ния (435). 9.5.3. Столкновительные отображения (441). 9.5.4. Отобра-	
жения в задаче $N$ тел (445).	
9.6. Сепаратрисы и перекрытие резонансов. . . . .	453
9.7. Вращение Гипериона. . . . .	457
9.8. Люки Кирквуда. . . . .	460
9.8.1. Резонансная структура главного пояса астероидов (461). 9.8.2. Ре-	
зонанс 3:1 (465). 9.8.3. Другие резонансы (469).	
9.9. Система Нептун–Плутон . . . . .	471
9.10. Устойчивость Солнечной системы . . . . .	473
Контрольные упражнения . . . . .	475
<b>Глава 10. Кольца планет. . . . .</b>	<b>478</b>
10.1. Введение. . . . .	478
10.2. Системы колец планет. . . . .	479
10.2.1. Кольца Юпитера (479).   10.2.2. Кольца Сатурна (481).	
10.2.3. Кольца Урана (483). 10.2.4. Кольца Нептуна (484). 10.2.5. Кольца	
и спутники (484).	
10.3. Резонансы в кольцах. . . . .	485
10.3.1. Возмущения большой полуоси и коротационные резонансы (486).	
10.3.2. Возмущения эксцентриситета и резонансы Линдблада (488).	
10.3.3. Возмущения наклона и вертикальные резонансы (491).	
10.3.4. Расположение резонансов (492).	



---

10.4. Волны плотности и изгибные волны .....	493
10.5. Узкие кольца и резкие края .....	497
10.5.1. Характерные времена размывания (497). 10.5.2. Локальные эффекты спутниковых возмущений (500). 10.5.3. Спутники-пастухи и радиальный конфайнмент (506). 10.5.4. Эксцентрические и наклонные кольца (508). 10.5.5. Спутники в кольцах и подковообразные орбиты (512).	
10.6. Люк Энке и спутник Пан .....	514
10.7. Кольцо F Сатурна .....	517
10.8. Кольцо Адамса Нептуна .....	520
10.9. Эволюция колец .....	521
10.10. Пылевое кольцо Земли .....	523
Контрольные упражнения .....	525
Приложение А .....	527
Приложение Б .....	538
Литература .....	559
Предметный указатель .....	581