

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ (МОНОГРАФИЯ)

## Выходные данные

Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит. Томск: Изд-во НТЛ, 2010.  
282 с. ISBN 5-89503-445-3

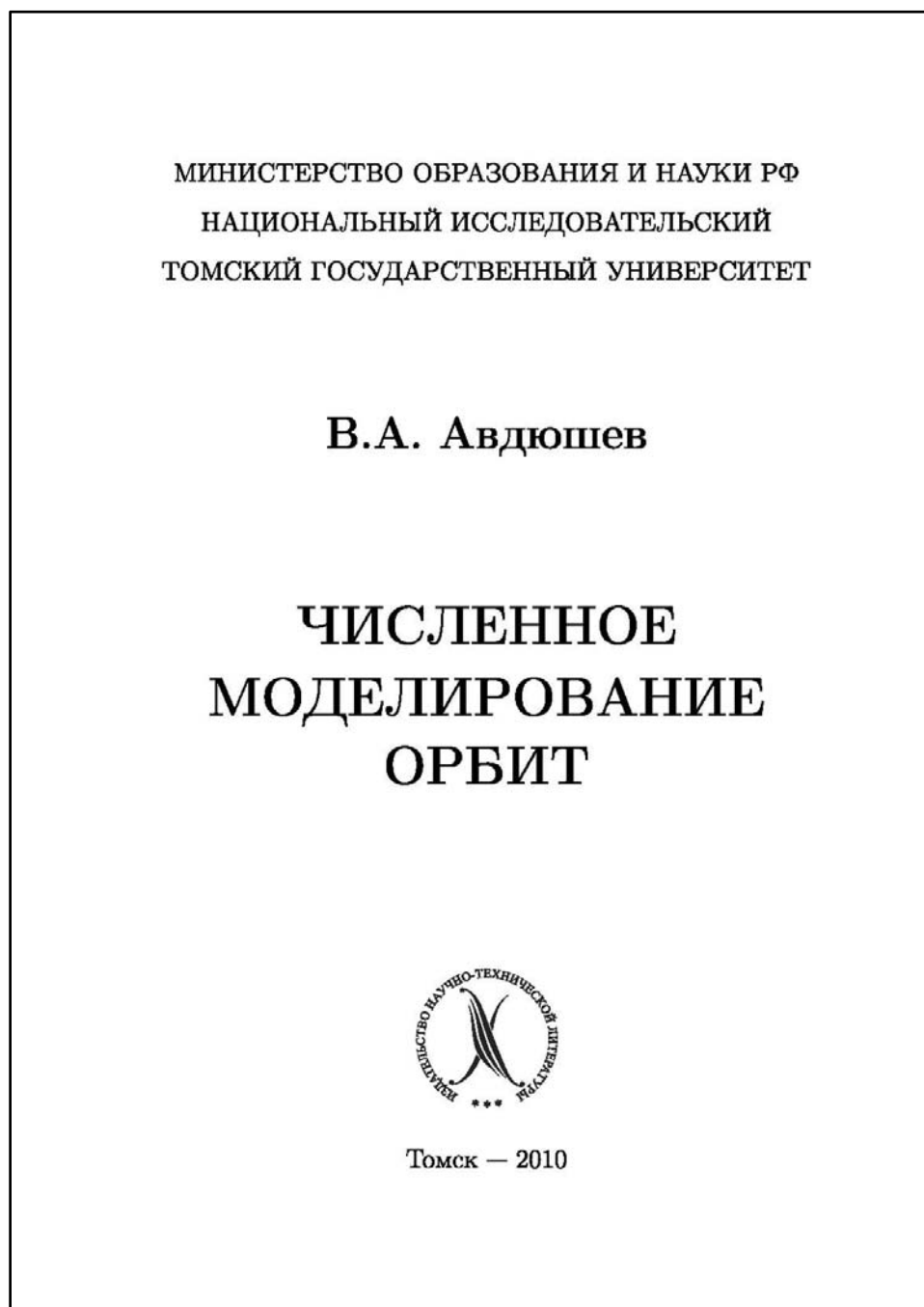


Рис. 1. Выходные данные

УДК 521  
А 186

**Авдюшев В.А.**  
А 186 Численное моделирование орбит. — Томск: Изд-во НТЛ,  
2010. — 282 с.

ISBN 5-89503-445-3

В монографии представлен вычислительно-математический инструментарий, предназначенный для численного моделирования орбит. Рассматриваются широко используемые на практике численные методы для решения прямой и обратной задач орбитальной динамики. Исследуется их эффективность применительно к численному моделированию орбит малых тел Солнечной системы.

Для специалистов в области небесной механики, а также студентов и аспирантов астрономических специальностей.

УДК 521

Рецензент:  
доктор физ.-мат. наук, проф. **Т.В. Бордовицына**

ISBN 5-89503-445-3

© В.А. Авдюшев, 2010

Рис. 2. Выходные данные

Научное издание

АВДЮШЕВ Виктор Анатольевич

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ**

Редактор *Н.И. Шидловская*

Верстка *автора*

---

Изд. лиц. ИД № 04000 от 12.02.2001 г. Подписано к печати 15.12.2010 г.  
Формат 60×84  $\frac{1}{8}$ . Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. п. л. — 14,57. Уч.-изд. л. — 16,32. Тираж 500 экз. Заказ № 30.

---

ООО «Издательство научно-технической литературы»  
634050, Томск, пр. Ленина, 34а, тел. (382-2) 53-33-35

Отпечатано в типографии ЗАО «М-Принт», г. Томск, ул. Пролетарская, 38/1

Рис. 3. Выходные данные

## **Аннотация**

В монографии представлен вычислительно-математический инструментарий, предназначенный для численного моделирования орбит. Рассматриваются широко используемые на практике численные методы для решения прямой и обратной задач орбитальной динамики. Исследуется их эффективность применительно к численному моделированию орбит малых тел Солнечной системы.

Для специалистов в области небесной механики, а также студентов и аспирантов астрономических специальностей.

## **Предисловие**

Численное моделирование является мощным средством для исследования орбит небесных тел. Оно стало уже почти традиционным в современной практике. Значение численного моделирования орбит трудно переоценить, поскольку его приложение очень широко. Орбиты в компьютерной миниатюре позволяют изучать происхождения небесных тел в прошлом и прогнозировать их траектории в будущем, проектировать космические миссии и оценивать вероятности столкновения астероидов с планетами, предсказывать с высокой точностью затменные явления и определять местоположения наземных объектов по навигационным спутниковым системам. Причем в государственных масштабах эти возможности реализуются без особо серьезных финансовых затрат. Ведь все, что необходимо, — это покупка компьютера и выплата зарплаты специалисту за его знание соответствующего вычислительно-математического инструментария и умение эффективно им пользоваться на практике. Данная монография как раз и представляет этот инструментарий.

Пожалуй, главной причиной, побудившей автора написание этой книги, является то обстоятельство, что за последнюю четверть века фактически не было издано ни одной подобной работы, при том что за этот же период времени были получены новые весьма интересные результаты и разработаны оригинальные методы по численному моделированию орбит (см., например, Hairer E., Lubich C., Wanner G. *Geometric Numerical Integration: Structure-Preserving Algorithms for Ordinary Differential Equations*. Springer, 2002; Авдюшев В.А. *Методы теории специальных возмущений. I. Принципы построения и обоснование к приме-*

нию // Изв. вузов. Физика. 2006b. Т. 49. Вып. 12. С. 73–80; Авдюшев В.А. Методы теории специальных возмущений. II. Сравнительный анализ численной эффективности // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. Вып. 1. С. 78–86). Последняя фундаментальная работа на эту тему (Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984) вышла еще в прошлом веке, в начале восьмидесятых. Стоит отметить, что она до сих пор пользуется большим спросом среди специалистов. Впоследствии уже в текущем тысячелетии предпринималась попытка переиздания ее основной части в рамках учебного пособия (Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения искусственных спутников Земли. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007). Однако соответствующий материал относительно численного моделирования не был подвергнут серьезной редакции и, кроме того, в прикладном плане ограничивался рассматриваемыми в пособии задачами динамики искусственных спутников Земли.

Помимо всего прочего, необходимо отметить, что в указанных выше работах представлен инструментарий лишь для решения прямых задач. Разумеется, именно решение прямой задачи обеспечивает прогнозирование орбитального движения любого небесного тела. Однако в действительности это оказывается возможным только в том случае, если параметры орбитальной модели известны. Если они неизвестны, то соответственно модель не будет иметь практической ценности. Как раз в результате решения обратной задачи из наблюдений небесного тела определяются орбитальные параметры. В этой связи, чтобы повысить прикладную значимость излагаемого материала, автор счел нужным включить в свою работу также методический аппарат, применяемый к решению обратных задач орбитальной динамики, причем предназначенный не только для определения орбит, но и для численного оценивания точности их параметров, что сейчас особенно востребовано и бурно развивается главным образом благодаря возрастающему интересу к проблеме астероидной опасности.

Настоящая монография не претендует на всеобъемлющий обзор требуемого для моделирования математического аппарата. Тем не менее, по мнению автора, изложенного материала здесь вполне достаточно для освоения, по крайней мере, основ численного моделирования орбит. В любом случае при необходимости в получении более детальной информации читатель может обратиться к цитируемой литературе, приведенной в конце монографии.

## Краткое содержание

Содержательная часть книги состоит из семи глав:

- I. Численная модель орбиты;
- II. Модели сил;
- III. Дифференциальные уравнения орбит;
- IV. Методы интегрирования;
- V. Определение параметров модели из наблюдений;
- VI. Методы оценивания параметрической точности;

Первая глава вводная и поэтому занимает всего несколько страниц. В ней дается общее определение численной модели орбитального движения, а также обязательные атрибуты и характеристики эффективности численного моделирования.

Во второй главе описываются математические модели основных сил, обуславливающих орбитальное движение. Это — гравитационные силы протяженного тела и материальной точки; радиационные и реактивные силы, вызванные солнечным светом; силы атмосферного торможения, а также некоторые возмущающие силы общей теории относительности в постньютоновском приближении. На примере внутреннего спутника Юпитера, Амальтеи, проводится анализ структуры основных силовых факторов в спутниковом движении.

Третья глава посвящена теоретическому и практическому исследованию огромного арсенала различных дифференциальных уравнений, представляющих математические модели орбитального движения. В частности, рассматриваются линейные и регулярные уравнения; уравнения Энке и Лагранжа; стабилизированные уравнения Баумгарта и т.д. В главе также дается обоснование их применения к численному решению задач небесной механики. Проводится сравнительный анализ эффективности уравнений орбитального движения применительно к численному моделированию спутниковых, астероидных и планетных орбит, для того чтобы дать четкие рекомендации по их использованию.

В четвертой главе рассматриваются широко используемые на практике методы численного интегрирования дифференциальных уравнений орбитального дви-

жения. Излагаются основные принципы их построения. В частности, рассматриваются методы Рунге–Кутты; экстраполяционные и многошаговые методы, а также так называемые геометрические методы. Описываются результаты сравнительного анализа эффективности методов применительно к невозмущенным, слабовозмущенным и сильновозмущенным задачам небесной механики.

Следующие две главы посвящены методам численного решения обратных задач орбитальной динамики, иначе говоря, методам определения орбит из астрометрических наблюдений и оценивания точности определяемых орбитальных параметров. В пятой главе описываются итерационные методы минимизации целевой функции, характеризующей близость наблюдаемых и моделируемых величин. В частности, рассматриваются известные методы численной оптимизации, а именно: метод (наискорейшего) градиентного спуска, методы Гаусса–Ньютона и Левенберга–Марквардта, а также овражный составной метод, предлагаемый автором для решения обратных задач динамики близких спутников планет. Проводится сравнительный анализ эффективности методов на примере определения орбиты близкого спутника Юпитера Адрастеи.

Шестая глава — это фактически обзор стохастических линейных и нелинейных методов типа Монте-Карло для численного оценивания точности определяемых из наблюдений орбитальных параметров. Все эти методы основаны на концепциях классического регрессионного анализа. В конце главы описываются результаты стохастического моделирования при использовании исследуемых методов для оценивания точности орбиты нового внешнего спутника Юпитера S/2003 J04, параметры движения которого плохо определены вследствие скудного состава имеющихся на данный момент наблюдений. Вводится показатель нелинейности обратной задачи, необходимый главным образом для принятия решения в выборе между линейными и нелинейными методами.

В конце монографии приводится список цитируемых научных работ и предметный указатель используемых терминов, а в приложении даются основные формулы (интегралы и соотношения) задачи двух тел, которые могут быть полезными при численном моделировании орбит.