

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ (МОНОГРАФИЯ)**

## **Выходные данные**

Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит небесных тел. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 336 с. ISBN 978-5-94621-519-0

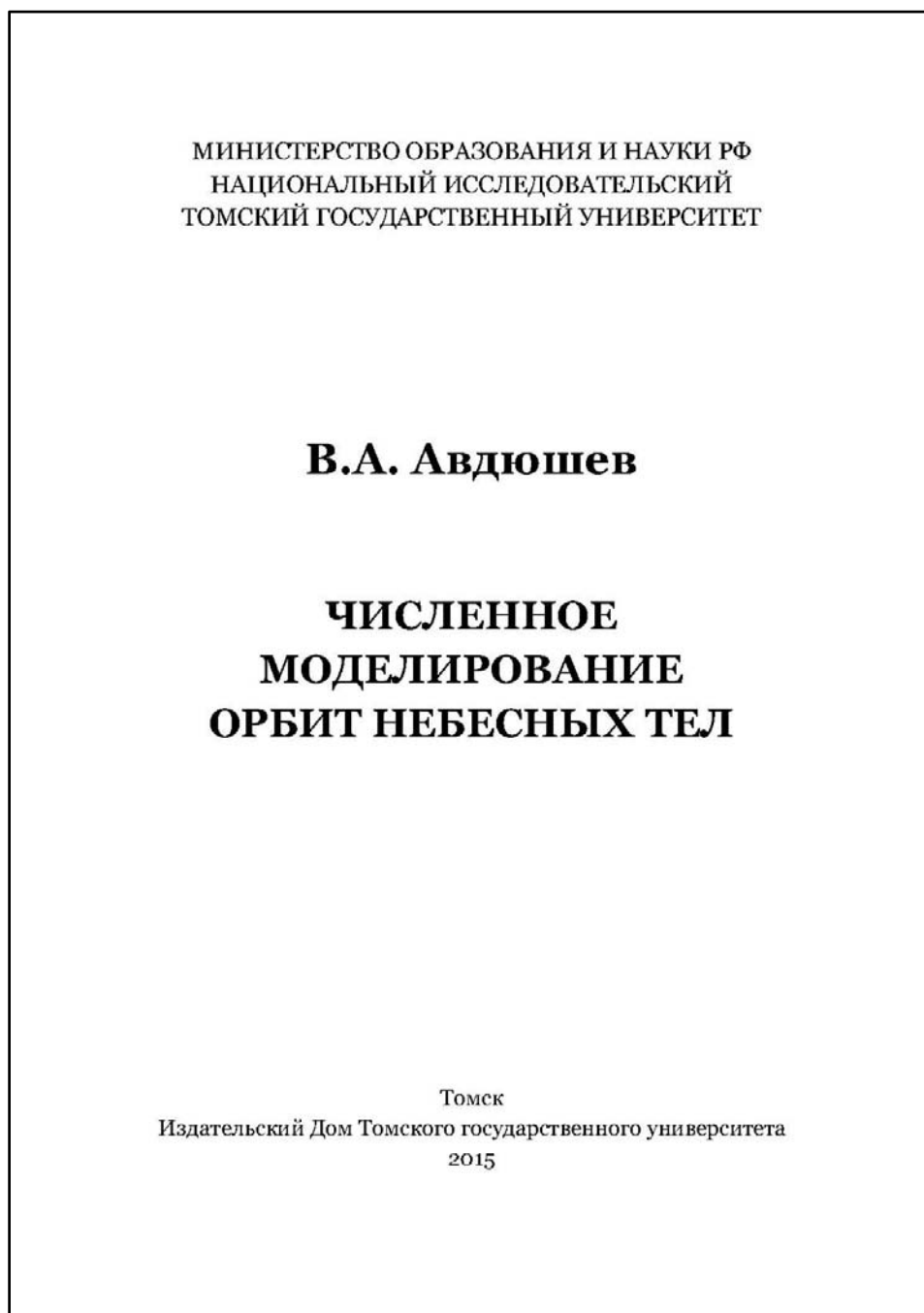


Рис. 1. Выходные данные

**УДК 521**  
**ББК 22.62**  
**A186**

**Авдюшев В.А.**

**A186** Численное моделирование орбит небесных тел. —  
Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. — 336 с.

**ISBN 978-5-94621-519-0**

В монографии представлен вычислительно-математический инструментарий, предназначенный для численного моделирования орбит небесных тел. 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**  
**ББК 22.62**

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

ISBN 978-5-94621-519-0 © Авдюшев В.А., 2015  
© Томский государственный университет, 2015

Рис. 2. Выходные данные

*Научное издание*

**АВДЮШЕВ Виктор Анатольевич**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ  
НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**

*Издание подготовлено в авторской редакции  
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой*

Подписано к печати 07.02.2015 г. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.

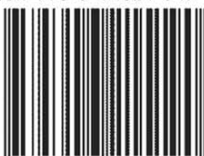
Бумага для офисной техники. Гарнитура Georgia.

Усл. печ. л. 19,5.

Тираж 250 экз. Заказ № 1415.

Отпечатано на оборудовании  
Издательского Дома  
Томского государственного университета  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
Тел. 8+(382-2)-53-15-28  
Сайт: <http://publish.tsu.ru>  
E-mail: [rio.tsu@mail.ru](mailto:rio.tsu@mail.ru)

ISBN 978-5-94621-519-0



9 785946 215190

Рис. 3. Выходные данные

## **Аннотация**

В монографии представлен вычислительно-математический инструментарий, предназначенный для численного моделирования орбит небесных тел. 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 применение очень широко. Орбиты в компьютерной миниатюре позволяют прогнозировать движение небесных тел в будущем и выявлять обстоятельства их происхождения в прошлом, 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 эти возможности открываются фактически для каждого, у кого просто есть компьютер, неважно, супер он или нет. (К настоящему времени вполне приличный компьютер уже не роскошь. Кстати, почти все численные результаты, представленные в монографии, были получены на малобюджетном ноутбуке. Между тем, что касается программного обеспечения, то среди необходимых для моделирования приложений сейчас достаточно много бесплатных.) Страстно жаждущему макрокосмических исследований в микрокосмосе цифр остается только освоить соответствующий вычислительно-математический инструментарий и научиться им пользоваться на практике. Так вот, данная монография как раз и представляет этот инструментарий.

Стоит отметить, что трактат фактически является результатом значительной переработки предыдущей монографии автора (Авдюшев В.А. Численное моде-

лирование орбит. Томск: Изд-во НТЛ, 2010). До нее последняя фундаментальная работа на ту же тему (Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984) вышла в свет еще в прошлом веке, в начале восьмидесятых, почти четверть века назад. К слову, она до сих пор пользуется большим спросом среди специалистов. Впоследствии все же предпринималась попытка переиздать основную ее часть 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 только рассматриваемыми в пособии прямыми задачами орбитальной динамики искусственных спутников Земли. Собственно, эти обстоятельства и побудили автора написать свое предшествующее произведение (Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит. Томск: Изд-во НТЛ, 2010).

Настоящая монография, как и предыдущая, 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.

Образно говоря, любая численная модель должна быть столь же эффективной, сколь эффектна и грациозна топ-модель на подиуме: иные модели просто не востребованы ни в науке, ни в модельном шоу-бизнесе. Поэтому автор предпочел представить в изложении именно тот «концентрат», который действительно работает эффективно с точки зрения численного моделирования и уже одобрен широким кругом специалистов.

Конечно, внимательный читатель наверняка заметит особые предпочтения автора к задачам динамики тел Солнечной системы, что вовсе не удивительно, учитывая, что большая часть его работ была выполнена в рамках этой тематики. Впрочем, излагаемый инструментарий вполне может быть применен также и к решению иных задач динамической астрономии, например звездной или галактической динамики, которые не рассматриваются в монографии.

Безусловно, для адекватного восприятия материала от читателя требуется специальная подготовка, которую, впрочем, можно получить за государственный счет в вузе по прошествии двух общеобразовательных курсов на каком-либо естественнонаучном факультете, не игнорирующем, правда, астрономические дисциплины, либо выработать самостоятельно, проштудировав, по меньшей мере, несколько фундаментальных работ по небесной механике и вычислительной математике.

## **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 орбит из наблюдений;
- VI. Оценивание параметрической точности;
- VII. Линеаризация орбитальной модели

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 движения. 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, слабозвозмущенным 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.

Последняя глава — факультативная. В ней рассматриваются основанные на линеаризации орбитальной модели преобразования и некоторые их приложения к численному исследованию орбит, а именно для временного переноса доверительных областей и вычисления ляпуновских показателей, а также для оперативного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой.

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.