

На правах рукописи

Абрамов Владимир Владимирович

**Численное моделирование движения
небесных тел на основе методов Адамса
с высоким порядком аппроксимации**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара – 2009

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ).

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор, Заусаев Анатолий Федорович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор, Жданов Александр Иванович доктор физико-математических наук, профессор, Филатов Олег Павлович
Ведущая организация:	Учреждение Российской академии наук «Институт астрономии РАН»

Защита состоится 11 декабря 2009 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.05 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева» (СГАУ), расположенном по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д. т. н., профессор

Калентьев А. А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В последние годы достижения в области математического моделирования и вычислительного эксперимента как информационной технологии получения новых знаний об окружающем нас мире приобретают все большее значение для различных областей наук.

В связи с увеличением объема информации о динамических параметрах малых тел Солнечной системы возрос интерес к проблеме «астероидной опасности». В настоящее время известно свыше шести тысяч астероидов, проникающих внутрь орбиты Марса и Земли. Наибольшую опасность для Земли, наряду с кометами, представляют астероиды групп Аполлона, Амура, Атона.

Теория движения астероидов групп Аполлона, Амура, Атона значительно сложнее теории движения планет, поскольку эллиптические орбиты астероидов более вытянуты, чем орбиты планет, плоскости орбит значительно наклонены к плоскости эклиптики. Кроме того, астероиды имеют тесные сближения с большими планетами. Поскольку высокоэффективные аналитические теории движения астероидов, имеющих сближения, не разработаны, для исследования эволюции их орбит широко применяются численные методы.

Исследование их эволюционных процессов, устойчивости движения, оценка вероятности столкновения и предотвращение катастрофических последствий является лишь неполным перечнем проблем, требующих решения. Разработка численных методов для решения уравнений движения небесных тел является одним из составных этапов при решении проблемы, связанной с «астероидной опасностью».

Все вышеперечисленные задачи не являются в настоящее время окончательно изученными, что и определяет актуальность рассматриваемой в диссертации проблемы.

Цель диссертационной работы

Разработка вычислительных алгоритмов многошаговых методов Адамса с высоким порядком аппроксимирующих формул и программного обеспечения на их основе для исследования движения небесных тел.

В соответствии с указанной целью необходимо было решение следующих задач:

1. Разработка вычислительных алгоритмов методов Адамса с высоким порядком аппроксимации для решения обыкновенных дифференциальных уравнений.
2. Создание математического и программного обеспечения для исследования движения астероидов групп Аполлона, Амура, Атона, сближающихся с Землей.

3. Создание информационной базы данных малых тел Солнечной системы (астероидов групп Аполлона, Амура, Атона и короткопериодических комет) на интервале времени 400 лет (1800–2206 гг.).
4. Выявления наиболее опасных объектов и классификация астероидов, представляющих потенциальную угрозу для Земли в случае столкновения с ней.
5. Создание Интернет-ресурса и размещение на нем полной информации об эволюции орбит малых тел Солнечной системы.

Научная новизна

1. Разработаны вычислительные алгоритмы универсальных многошаговых методов Адамса, которые в отличие от ранее существующих алгоритмов обладают более высоким (до 16-го включительно) порядком аппроксимирующих формул.
2. Разработан комплекс программного обеспечения для математического моделирования движения малых тел Солнечной системы на основе методов Адамса с использованием нового критерия изменения шага интегрирования.
3. Создана информационная база данных орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы на интервале времени 400 лет (1800–2206 гг.).

Практическая значимость

1. Разработанные вычислительные алгоритмы методов Адамса имеют универсальный характер и могут применяться для решения различного рода задач описываемых дифференциальными уравнениями.
2. Данные об эволюции элементов орбит астероидов групп Аполлона, Амура, Атона и короткопериодических комет могут быть использованы при организации и планировании наблюдений этих объектов, а также для прогнозирования их движения.
3. Информационная база данных орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы, размещенная на Интернет-ресурсе `SmallBodies.Ru` может быть полезной как для учебной, так и научных целей.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения

1. Вычислительные алгоритмы для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе многошаговых методов Адамса с высоким (до 16-го включительно) порядком аппроксимирующих формул.
2. Алгоритмы и программное обеспечение для математического моделирования движения малых тел Солнечной системы.

3. Результаты исследования эволюции орбит малых тел Солнечной системы на интервале времени с 1800 по 2206 гг.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований

Выполнено сопоставление координат и скоростей больших планет, Луны и Солнца на стандартные моменты с данными одной из точных современных численных теорий движения планет DE 405, согласованной с оптическими и радиолокационными наблюдениями. Показано, что отличие от данных DE 405 находятся в пределах точности наблюдений.

Проведено сравнение эволюции орбит малых тел Солнечной системы, полученных методами Адамса и Эверхарта на интервале времени с 1800 по 2206 гг. Показано, что результаты двух методов для малых тел, не имеющих тесных сближений с большими планетами, согласуются вполне удовлетворительно.

Данные эволюции орбит находятся в хорошем согласии как с наблюдениями, так и с результатами других исследований, проведенных в нашей стране и за рубежом.

Связь диссертационной работы с планами научных исследований

Работа выполнялась в рамках плана НИР СамГТУ (тема «Разработка методов математического моделирования динамики и деградации процессов в механике сплошных сред, технических, экономических, биологических и социальных системах и методов решения неклассических краевых задач и их приложений»); проекта Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1.1689): «Создание информационной среды на базе современных математических моделей и методов для исследования эволюции малых тел в Солнечной системе» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)»; проекта Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1.745): «Создание научно-информационной базы данных эволюции орбит малых тел Солнечной системы, представляющих потенциальную опасность для Земли» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 гг.)».

Апробация работы

Результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на Третьей Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2006 г.); Втором Международном форуме «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2006 г.); Седьмом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной мате-

матике (г. Йошкар-Ола, 2006 г.); Конференции «Дифференциальные уравнения и их приложения» (г. Самара, 2007 г.); Четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2007 г.); Международном конгрессе «Нелинейный динамический анализ — 2007» (г. Санкт-Петербург, 2007 г.); Третьем Международном форуме «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2007 г.); Международной молодежной научной конференции «XXXIV Гагаринские чтения» (г. Москва, 2008 г.); Пятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи», (г. Самара, 2008 г.); Международной конференции «100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее» (г. Москва, 2008 г.); Седьмой Международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов», (г. Ульяновск, 2009 г.); Шестой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2009 г.); Международной конференции «Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты» (г. Казань, 2009 г.); Международной конференции «Астероидно-кометная опасность — 2009», (г. Санкт-Петербург, 2009 г.).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 21 печатной работе, из них 1 монография, 6 статей в рецензируемых журналах, 10 статей в сборниках трудов конференций и 4 тезиса докладов.

Личный вклад автора

Автору во всех работах, опубликованных в соавторстве, в равной степени принадлежат как постановки задач, так и результаты выполненных исследований.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и трех приложений, в которых приведены таблицы, графики и листинги разработанных программ. Общий объем диссертации составляет 141 страницу, включая 13 рисунков и 11 таблиц. Библиографический список включает 125 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе приводится краткий аналитический обзор современных численных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений, излагаются основные сведения из курса теоретической астрономии, дается схема математического моделирования движения небесных тел.

В главе описываются алгоритмы численных методов, основанных на разложении в ряды Тейлора, методов Рунге–Кутты, Эверхарта, экстраполяционные методы, многошаговые методы Адамса, Обрешкова, Коуэлла, блочные, гибридные методы. Представлена сравнительная характеристика этих методов. Также рассмотрены вопросы их сходимости и устойчивости.

Поскольку в диссертационной работе осуществляется математическое моделирование движения малых тел Солнечной системы, в первой главе приводится их краткое описание. Обосновывается необходимость создания каталогов орбитальной эволюции астероидов и комет как один из этапов решения проблемы «астероидно-кометной опасности». Также в главе рассматриваются эклиптическая и экваториальная гелиоцентрические системы координат и связь между ними, дается определение эфемеридного, всемирного времени и юлианских дней. Также приводятся понятия элементов орбит и рассматривается их связь с координатами.

В основе математической модели движения небесных тел лежат дифференциальные уравнения различной формы, в зависимости от конкретно решаемых задач. В главе рассматриваются уравнения движения небесных тел как с учетом только взаимного гравитационного взаимодействия, так и с учетом релятивистских эффектов, влияния фигур планет и Солнца.

В главе приводится подробная схема процесса математического моделирования эволюции орбит малых тел Солнечной системы на основе концепции А. А. Самарского. В конце главы по результатам обзора формулируются задачи и методы исследования.

Во второй главе рассматривается построение вычислительных алгоритмов многошаговых методов Адамса с высоким порядком аппроксимирующих формул для решения задачи Коши. Подробно описывается явный метод Адамса–Бэшфорта и неявный метод Адамса–Мултона в ординатной и разностной формах. Рассматривается реализация неявной схемы метода Адамса–Мултона и способы построения таблицы начальных значений для возможности запуска алгоритма многошагового метода. Приводятся коэффициенты методов Адамса–Бэшфорта и Адамса–Мултона до 16-го порядка включительно. Также описывается построение вычислительного алгоритма метода Адамса с переменным шагом в форме записи с разделенными разностями.

Многошаговые методы Адамса относятся к числу наиболее экономичных методов, так как при одинаковой точности на одном шаге численного интегрирования требуется меньше вычислений правых частей дифференциальных

уравнений по сравнению с одношаговыми методами. Также несомненным достоинством методов Адамса является их универсальность, то есть они могут быть применены для решения широкого класса задач, описываемых дифференциальными уравнениями.

Общая форма записи многошаговых методов имеет следующий вид

$$\sum_{i=0}^k \alpha_i y_{n+i} = h \sum_{i=0}^k \beta_i f(x_{n+i}, y_{n+i}), \quad \alpha_k \neq 0, \quad (1)$$

где h — шаг интегрирования, α_i и β_i — коэффициенты разностного уравнения (1), функция f — правая часть дифференциального уравнения в задаче Коши

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad x \in [a, b], \quad y(x_0) = y(a) = y_0. \quad (2)$$

Соотношение (1) является разностным уравнением k -го порядка. Чтобы выделить единственное решение этого уравнения, необходимо задать k дополнительных условий на функцию y_n . Этими дополнительными условиями являются значения функции y_n при $n = 0, 1, \dots, k-1$, которые предполагаются известными. Используя эти значения, можно найти y_k , затем, используя значения y_n при $n = 1, 2, \dots, k$, найти y_{k+1} и т. д.

Выражение

$$y_{n+1} - y_n = h \sum_{i=0}^k A_i f(x_{n+1-i}, y_{n+1-i}) \quad (3)$$

является частным случаем формулы (1) и представляет собой общую форму записи методов Адамса. Если неизвестное значение y_{n+1} не входит в правую часть, то выражение (3) записывается в виде

$$y_{n+1} - y_n = h \sum_{i=0}^k B_i f(x_{n-i}, y_{n-i}). \quad (4)$$

Выражение (4) называется явной или экстраполяционной формулой Адамса, записанной в ординатной форме, а соответствующий ей многошаговый метод численного интегрирования называется методом Адамса–Бэшфорта.

Если неизвестное значение y_{n+1} содержится в правой части (3), то выражение

$$y_{n+1} - y_n = h \sum_{i=0}^k M_i f(x_{n+1-i}, y_{n+1-i}) \quad (5)$$

называется неявной или интерполяционной формулой Адамса, записанной в ординатной форме, а соответствующий ей многошаговый метод численного интегрирования называется методом Адамса–Мултона.

На практике обычно не решают непосредственно уравнение (5), а используют, например, итерационные методы. Вместо неизвестного точного значения y_{n+1} в правую часть этого уравнения подставляется некоторое начальное приближение $y_{n+1}^{(0)}$. В качестве начального приближения чаще всего используют значение, полученное по явной разностной формуле метода Адамса–Бэшфорта. Процесс совместного использования методов Адамса–Бэшфорта и Адамса–Мултона называется методом прогноза и коррекции, который можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 P : y_{n+1}^{(0)} &= y_n + h \sum_{i=0}^k B_i f(x_{n-i}, y_{n-i}), \\
 E : f_{n+1}^{(1)} &= f(x_{n+1}, y_{n+1}^{(0)}), \\
 C : y_{n+1}^{(1)} &= y_n + h M_0 f_{n+1}^{(1)} + h \sum_{i=1}^k M_i f(x_{n+1-i}, y_{n+1-i}), \\
 &\vdots \\
 E : f_{n+1}^{(\nu)} &= f(x_{n+1}, y_{n+1}^{(\nu-1)}), \\
 C : y_{n+1}^{(\nu)} &= y_n + h M_0 f_{n+1}^{(\nu)} + h \sum_{i=1}^k M_i f(x_{n+1-i}, y_{n+1-i}) = y_{n+1}, \\
 E : f_{n+1} &= f(x_{n+1}, y_{n+1}).
 \end{aligned} \tag{6}$$

В рамках диссертационной работы были вычислены коэффициенты методов Адамса, записанных в ординатной форме, до 16-го порядка. С использованием полученных коэффициентов были составлены вычислительные алгоритмы методов Адамса–Бэшфорта и Адамса–Мултона со 2-го по 16-й порядок включительно.

Для методов Адамса в форме записи с разделенными разностями, позволяющей осуществлять численное интегрирование с переменным шагом, метод прогноза и коррекции при одной итерации выглядит следующим образом

$$\begin{aligned}
 P : y_{n+1}^p &= y_n + \sum_{i=0}^{k-1} g_{i1} f_{n,n-1,\dots,n-i}; \\
 E : f_{n+1}^p &= f(x_{n+1}, y_{n+1}^p); \\
 C : y_{n+1} &= y_{n+1}^p + g_{k1} f_{n+1,n,\dots,n-k+1}^p; \\
 E : f_{n+1} &= f(x_{n+1}, y_{n+1}),
 \end{aligned} \tag{7}$$

где разделенные разности, определяются рекуррентной формулой

$$f_{n,n-1,\dots,n-i} = \frac{f_{n,n-1,\dots,n-i+1} - f_{n-1,n-2,\dots,n-i}}{x_n - x_{n-i}}. \quad (8)$$

Коэффициенты могут быть получены в процессе численного интегрирования из соотношений:

$$g_{0j} = \frac{(x_{n+1} - x_n)^j}{j!}; \quad (9)$$

$$g_{ij} = (x_{n+1} - x_{n-i+1})g_{i-1,j} - jg_{i-1,j+1}. \quad (10)$$

Также во второй главе рассматриваются различного рода источники погрешностей при численном интегрировании методами Адамса. Приводятся некоторые методы оценки погрешностей, предлагаются различные способы уменьшения влияния погрешностей на результат численного интегрирования.

В третьей главе рассматривается применение вычислительных алгоритмов на основе методов Адамса для исследования эволюции орбит малых тел Солнечной системы. Описывается разработанный критерий изменения шага интегрирования. Приводится сравнение эффективности разработанных алгоритмов с алгоритмами других методов. Рассматривается исследование сходимости решения и достоверности результатов численного интегрирования при моделировании движения астероидов с помощью методов Адамса. На основании проведенных исследований выделяется класс объектов, для которых возможно использование методов Адамса, определяется область применимости метода Адамса с разделенными разностями при разработке каталога орбитальной эволюции астероидов.

В данной диссертационной работе при исследовании эволюции орбит малых тел Солнечной системы учитывались гравитационные и релятивистские эффекты от взаимного влияния девяти больших планет (Меркурий–Плутон), Солнца, Луны и самого исследуемого астероида, то есть двенадцати небесных тел. Движение каждого объекта описывается тремя обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка, каждое из которых описывает движение вдоль соответствующей координатной оси. Поскольку многошаговые методы Адамса напрямую не являются применимыми к дифференциальным уравнениям второго порядка, то каждое из трех полученных уравнений необходимо свести к системе двух дифференциальных уравнений первого порядка. Следовательно движение каждого объекта описывается шестью уравнениями. Таким образом, необходимо было произвести совместное численное интегрирование 72 дифференциальных уравнений на определенном интервале времени.

Поскольку методы Адамса являются многошаговыми, перед началом интегрирования требуется получить необходимое количество начальных значений с помощью какого-либо высокоточного одношагового метода. В данной работе для этих целей применялся модифицированный метод Эверхарта 27-го порядка точности.

Одной из основных задач данной диссертационной работы было исследование эволюции орбит малых тел Солнечной системы. Непрерывные возмущающие действия больших планет, в особенности Юпитера, приводят к медленным изменениям элементов орбит малых тел. Иногда происходят тесные сближения малых тел Солнечной системы с большими планетами, в результате чего происходит резкое изменение элементов орбит малых тел. Разностные многошаговые методы, в том числе и методы Адамса, являются весьма чувствительными к подобного рода скачкам. В результате происходит потеря устойчивости решения, что приводит к катастрофическому искажению результата.

Решение данной проблемы состоит в том, что моменты сближений небесных тел должны быть просчитаны с меньшим шагом. Следовательно, алгоритм численного интегрирования уравнений движения должен обладать возможностью изменения величины шага непосредственно в процессе интегрирования.

Поэтому при исследовании эволюции орбит астероидов более предпочтительным является использование метода Адамса в форме записи с разделенными разностями (7), которая позволяет производить численное интегрирование с переменным шагом. Это дает несколько преимуществ по сравнению с использованием методов Адамса с постоянным шагом (6). Во-первых, изменение величины шага интегрирования в методе Адамса с разделенными разностями не требует производить закладку таблицы интегрирования и какие-либо другие дополнительные вычисления. Во-вторых, возможность плавного изменения величины шага упрощает построение критериев выбора оптимального шага интегрирования. В-третьих, данный алгоритм обладает более высоким быстродействием без существенной потери точности.

На каждом шаге интегрирования величина следующего шага в методе Адамса с разделенными разностями определялась по алгоритму, который можно представить в виде:

$$h(a) = \begin{cases} h_0, & a \leq a_0, \\ h_0 \left(\frac{a_0}{a}\right)^s, & a > a_0, \end{cases} \quad (11)$$

где

$$a_0 = k^2 \frac{m_0}{r_0^2}. \quad (12)$$

Величины s , k , m_0 , r_0 , a_0 являются константами, поэтому величина шага интегрирования h зависит только от переменной a , которая выбиралась следующим образом. На каждом шаге определялись модули ускорений, сообщаемые исследуемому j -му телу остальными телами за исключением Солнца. Максимальное значение из полученных модулей ускорений и выбиралось в качестве переменной a :

$$a = \max_{i=1, n} a_i, \quad i \neq j. \quad (13)$$

Остальные величины были выбраны еще до запуска алгоритма, исходя из следующих соображений. Известно, что можно производить численное интегрирование методом Адамса с постоянным шагом $h_0 = 0,2$ дня до тех пор, пока исследуемый объект не сблизится на расстояние $r_0 = 0,05$ а.е. с Землей, масса которой составляет $m_0 = 3,00349 \cdot 10^{-6}$ солнечной. Тогда, согласно формуле (12), критическое ускорение $a_0 = 3,555 \cdot 10^{-7}$. Константа s влияет на плавность изменения шага. В данной работе для нее было выбрано значение $s = 1/2$. Константа $k = 0,01720209895$ является постоянной Гаусса.

Для оценки эффективности и точности методов Адамса был выбран модифицированный метод Эверхарта 27-го порядка точности. Высокая эффективность этого метода была подтверждена путем сопоставления результатов, полученных с его помощью, с данными теории DE 405, которые, в свою очередь, согласованы как с оптическими, так и с радиолокационными наблюдениями.

Было проведено решение уравнений движения больших планет, Луны и Солнца с шагом интегрирования 0,25 дня и 11-м порядком точности на интервале времени с 1600 по 2200 гг. При расчете учитывались релятивистские эффекты, несферичность Земли и Луны, а также влияние пояса астероидов, смоделированного 50-ю частицами, лежащих на орбите, принадлежащей главному поясу астероидов.

Отклонения вычисленных координат планет, полученных методом Адамса–Мултона 11-го порядка и модифицированным методом Эверхарта 27-го порядка, очень малы и находятся в пределах точности оптических наблюдений. Полученные результаты указывают на высокую эффективность метода Адамса–Мултона 11-го порядка при исследовании движения больших планет на длительных интервалах времени. Следует отметить, что численное интегрирование уравнений движения Солнца, больших планет и Луны с помощью метода Адамса 11-го порядка с шагом 0,25 дня производится приблизительно в четыре раза быстрее, чем с помощью модифицированного метода Эверхарта 27-го порядка с шагом в один день.

Однако исследование сходимости решения и достоверности результатов численного интегрирования при моделировании движения астероидов с помощью методов Адамса показало, что с использованием последних удастся

достигнуть требуемой точности не для всех объектов. Данная проблема связана с наличием тесных сближений малых тел с большими планетами. Это приводит к снижению устойчивости решения уравнений движения, поскольку при каждом последующем сближении происходит достаточно резкое увеличение ошибок, накапливаемых в результате предыдущих сближений.

Оценка сходимости решения проводилась путем численного интегрирования уравнений движения астероидов методами Адамса с различным шагом и дальнейшего сравнения полученных результатов. Было показано, что для астероидов, имеющих несколько тесных сближений, сходимость решения на длительных интервалах времени не обеспечивается. Исследование достоверности результатов численного интегрирования путем их сопоставления с соответствующими результатами, полученными с помощью модифицированного метода Эверхарта, показало, что потеря точности возникает после нескольких подряд тесных сближений малого тела с большими планетами. Величина временного интервала, на котором результаты сохраняют требуемую точность, зависит от количества тесных сближений и минимального расстояния между телами в моменты сближений.

На основании проведенного анализа был сделан вывод, что метод Адамса 12-го порядка с разделенными разностями может быть успешно применен для исследования орбитальной эволюции астероидов, не имеющих тесных сближений с большими планетами или Луной. При этом допускается наличие умеренных сближений на расстояние не менее, чем 0,01 а. е. Процесс численного интегрирования движения таких астероидов с помощью метода Адамса с переменным шагом осуществляется приблизительно в 3–4 раза быстрее, чем при использовании метода Эверхарта 27-го порядка.

Таким образом, было решено задействовать метод Адамса с переменным шагом при создании каталога орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы для объектов, не имеющих тесных сближений. Для исследования движения астероидов, имеющих тесные сближения с большими планетами, которые были выявлены в предыдущих расчетах, необходимо проводить вычисления методом Эверхарта.

При создании нами в 2006 году первоначальной печатной версии каталога орбитальной эволюции астероидов среди 3823 астероидов групп Аполлона, Амура и Атона был выделен лишь 291 объект, сближающийся с большими планетами и Луной на расстояние менее 0,01 а. е. на интервале времени с 1800 по 2204 гг., что составляет менее 10% от общего количества объектов, участвующих в расчетах. Таким образом, при обновлении электронного каталога более чем для 90% всех астероидов можно выполнять повторное вычисление с помощью более быстродействующего метода Адамса. Это позволит значи-

тельно сократить общие временные затраты на полный перерасчет орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы.

В четвертой главе рассматривается программное обеспечение для численного интегрирования уравнений движения небесных тел с помощью методов Адамса, приводится краткое описание программного комплекса на основе метода Эверхарта, используемого для оценки точности методов Адамса, описывается разработка электронного каталога орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы в виде информационной базы, размещенной на Интернет-ресурсе SmallBodies.Ru.

Для выполнения исследования эволюции орбит малых тел, была разработана программа, позволяющая произвести численное интегрирование уравнений движения Солнца, больших планет, Луны и исследуемого малого тела Солнечной системы на любой требуемый интервал времени в прошлое или в будущее; определить моменты максимальных сближений исследуемого тела с большими планетами; оценить изменения элементов орбиты малого тела с течением времени и в результате тесных сближений.

Численное интегрирование уравнений движения может осуществляться с помощью метода прогноза и коррекции (6) с возможностью переключения шага и порядка. Закладка таблицы интегрирования в начальный момент и в моменты переключений шага интегрирования и порядка осуществляется с помощью метода Эверхарта 27-го порядка. Также в качестве метода численного интегрирования можно выбрать метод Адамса с разделенными разностями (7), позволяющий проводить интегрирование с переменным шагом, что является более предпочтительным.

Вывод результатов вычислений осуществляется в виде таблиц, содержание которых легко анализируется. Также в программе реализован режим трехмерного просмотра, позволяющий увидеть пространственное расположение объектов и их орбит в любой момент времени, визуально оценить изменение орбит небесных тел в результате тесных сближений.

В программе имеется возможность увеличить или замедлить скорость анимации, осуществить просмотр назад, изменять положение точки, из которой ведется наблюдение, а также производить наведение на одно из небесных тел. Помимо этого в программе реализована возможность построения орбит не только вокруг Солнца, но и вокруг любого другого объекта. Для изображения тел используются эллипсоиды вращения с соблюдением реальных масштабов и степени сжатия (за исключением астероида) и нанесенной на их поверхность текстурой. Помимо этого, осуществляется вращение небесных тел вокруг их оси, наклоненных под реальным углом к плоскости их орбиты, и смена фаз в зависимости от положения тела относительно Солнца. В результате имеется возможность приблизительно оценить условия видимости

с конкретной точки на земной поверхности сближающегося с Землей небесного тела, а также определить место его возможного падения.

Для оценки точности и достоверности результатов численного интегрирования уравнений движения небесных тел методом Адамса в данной диссертационной работе были использованы данные, полученные с помощью программного обеспечения на основе модифицированного метода Эверхарта 27-го порядка с переменным шагом интегрирования, адаптированным для решения астероидной задачи. Описание данного программного обеспечения также приведено в четвертой главе.

Программа на основе метода Эверхарта позволяет вычислить эволюцию орбит любого астероида на любом заданном интервале времени. В комплекс данного программного обеспечения входит также приложение, позволяющее автоматизировать процесс вычислений большого количества объектов. Результатом работы описанного программного обеспечения являются вычисленные значения координат и скоростей исследуемых астероидов с интервалом 100 дней, которые и использовались при сопоставлении данных, полученных с помощью метода Адамса.

В рамках данной диссертационной работы был разработан Интернет-ресурс SmallBodies.Ru на русском и английском языках с динамическим веб-интерфейсом, на котором была размещена информационная база электронного каталога орбитальной эволюции астероидов групп Аполлона, Амура, Атона и короткопериодических комет.

В настоящее время сайт содержит сведения о 6 163 астероидах групп Аполлона, Амура, Атона. При этом выявлено 612 объектов, сближающихся с Землей на расстояние менее 0,01 а. е. То есть с момента создания первоначальной версии в 2006 году за три года количество объектов возросло примерно в два раза. Также на сайте содержатся сведения о 197 короткопериодических кометах. Информация на сайте обновляется каждые 100 дней. Обновления включают в себя сведения об объектах, которые были открыты с момента последнего обновления, а также уточненные данные об открытых ранее астероидах и кометах.

Сайт SmallBodies.Ru позволяет осуществлять поиск интересующего объекта, производить отбор астероидов и комет по заданным критериям, просматривать данные о тесных сближениях малых тел с большими планетами, начальные данные выбранного объекта, данные о его орбитальной эволюции в виде таблиц, графиков и в режиме трехмерного просмотра.

Следует отметить, что разработанный сайт в настоящее время не имеет аналогов в России, по функциональности и удобству использования не уступает, а в некоторых аспектах и превосходит немногочисленные зарубежные

сайты, содержащие электронные каталоги орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы.

В заключении перечислены основные результаты, полученные при выполнении данной диссертационной работы:

- 1) разработана математическая модель на основе методов Адамса, описывающая движение малых тел Солнечной системы, создано программное обеспечение для реализации этих методов;
- 2) проведено исследование метода Адамса с разделенными разностями для выделения области применимости полученной математической модели и разработанного программного обеспечения при создании каталога орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы;
- 3) на основе метода Адамса было проведено вычисление орбитальной эволюции выделенного класса объектов на интервале времени 400 лет;
- 4) полученные данные были использованы при обновлении электронного каталога орбитальной эволюции астероидов групп Аполлона, Амура, Атона на интервале времени с 1800 по 2206 гг.;
- 5) разработан Интернет-ресурс SmallBodies.Ru на русском и английском языках с динамическим веб-интерфейсом, содержащий информационную базу орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы.

Разработанное математическое и программное обеспечение имеет универсальный характер и может применяться для решения различного рода задач описываемых дифференциальными уравнениями. Данные об эволюции элементов орбит астероидов групп Аполлона, Амура, Атона, и короткопериодических комет могут быть использованы при организации и планировании наблюдений этих объектов, а также для прогнозирования их движения для решения проблемы «астероидной опасности».

Информационная база данных эволюции орбит малых тел Солнечной системы, размещенная на сайте SmallBodies.Ru, также может использоваться в учебном процессе образовательных учреждений при обучении астрономии и небесной механике школьников, студентов и аспирантов.

Список публикаций

Монография

1. *Заусаев А. Ф., Абрамов В. В., Денисов С. С.* Каталог орбитальной эволюции астероидов, сближающихся с Землей с 1800 по 2204 гг. — М.: Машиностроение-1, 2007. — 608 с.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК России

2. *Абрамов В. В.* Математическое моделирование движения малых тел Солнечной системы на основе методов Адамса // *Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2006. — № 43. — С. 192–194.
3. *Абрамов В. В.* Исследование устойчивости решения уравнений движения малых тел Солнечной системы при использовании метода Адамса–Мултона // *Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2007. — № 1(14). — С. 192–194.
4. *Абрамов В. В.* Математическое моделирование тесных сближений малых тел Солнечной системы с большими планетами и Луной // *Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2007. — № 2(15). — С. 151–154.
5. *Абрамов В. В.* Математическое моделирование движения астероида 99942 Apophis на основе методов Адамса с переменным шагом // *Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2008. — № 1(16). — С. 140–144.
6. *Абрамов В. В.* Электронный каталог орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы: разработка информационной базы и Интернет-ресурса // *Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2008. — № 2(17). — С. 275–278.
7. *Абрамов В. В., Денисов С. С., Заусаев А. Ф., Соловьев Л. А.* Выявление астероидов группы Аполлона, Амура, Атона, представляющих потенциальную угрозу для Земли // *Обзорение прикладной и промышленной математики.* — 2007. — Т. IV, № 2. — С. 256–257.

Публикации в других журналах и сборниках научных трудов

8. *Абрамов В. В.* Математическое моделирование движения астероида 99942 Apophis на основе метода Адамса–Мултона // *Актуальные проблемы современной науки: Труды 2-го Междунар. форума (7-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов). Естественные науки.* — Т. 1–3: Математика. Математическое моделирование. Механика. — Самара: СамГТУ, 2006. — С. 7–11.
9. *Абрамов В. В.* Применение методов Адамса к решению уравнений движения больших планет, Луны и Солнца // *Математическое моделирование и краевые задачи: Труды III Всерос. научн. конф.* — Т. 3. — Самара: СамГТУ, 2006. — С. 13–19.

10. *Абрамов В. В.* Исследование сходимости решения при моделировании тесных сближений небесных тел с помощью метода Адамса–Мултона // Актуальные проблемы современной науки: Труды 3-го Междунар. форума (8-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов). Естественные науки. — Т. 3: Механика. Машиностроение. — Самара: СамГТУ, 2007. — С. 6–14.
11. *Абрамов В. В.* Исследование устойчивости метода Адамса–Мултона при моделировании тесных сближений небесных тел // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды IV Всерос. научн. конф. — Т. 3. — Самара: СамГТУ, 2007. — С. 13–17.
12. *Абрамов В. В.* Совместное использование методов Адамса и Эверхарта для решения уравнений движения небесных тел // СамДиф–2007: конференция «Дифференциальные уравнения и их приложения», г. Самара, 29 января–2 февраля 2007 г. Тезисы докладов. — Самара: «Универс групп», 2007. — С. 16–17.
13. *Абрамов В. В.* Эффективность метода Адамса–Мултона при математическом моделировании движения малых тел Солнечной системы // Нелинейный динамический анализ —2007: Тезисы докладов междунар. конгресса, СПб, 4–8 июня 2007 г. — СПб.: СПбГУ, 2007. — С. 184.
14. *Абрамов В. В.* Исследование достоверности результатов численного интегрирования уравнений движения астероидов методом Адамса с переменным шагом // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды V Всерос. научн. конф. с междунар. участием. — Т. 3. — Самара: СамГТУ, 2008. — С. 8–14.
15. *Абрамов В. В.* Математическое моделирование движения малых тел Солнечной системы на основе методов Адамса с переменным шагом // XXXIV Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8-ми томах. — Т. 5. — Москва: 2008. — С. 32–33.
16. *Абрамов В. В.* Математическое моделирование орбитальной эволюции астероидов с использованием метода Адамса с переменным шагом // Труды 7-й Международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов», г. Ульяновск, 2–5 февраля 2009 г. — Ульяновск: 2009. — С. 17–18.
17. *Абрамов В. В.* Область применимости метода Адамса при разработке каталога орбитальной эволюции астероидов // Математическое моделиро-

вание и краевые задачи: Труды VI Всерос. научн. конф. с междунар. участием. — Т. 3. — Самара: СамГТУ, 2009. — С. 9–15.

18. *Абрамов В. В.* Программное обеспечение и математическое моделирование движения малых тел Солнечной системы на основе методов Адамса // Труды международной конференции «Астрономия и всемирное наследие: через время и континенты». — Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. — С. 95–96.
19. *Абрамов В. В.* Математическое моделирование движения астероидов на основе методов Адамса с переменным шагом // Тезисы докладов Международной Конференции «100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее», 26–28 июня, Москва, 2008. — С. 92–93.
20. *Abramov V. V.* Website development for the database of orbital evolution of small bodies of the Solar System // International Conference Asteroid-Comet Hazard — 2009, September 21–25, 2009, St. Petersburg, Russia. Book of Abstracts. — St. Petersburg: IAA RAS, 2009. — Pp. 190–191.
21. *Zausaev A. F., Zausaev A. A., Abramov V. V., Denisov S. S.* Database development of the Solar System small bodies' orbital evolution based on modern mathematical models and methods // International Conference Asteroid-Comet Hazard — 2009, September 21–25, 2009, St. Petersburg, Russia. Book of Abstracts. — St. Petersburg: IAA RAS, 2009. — Pp. 69–70.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.215.05
ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева»
(протокол № 29 от 21 октября 2009 г.)

Заказ № 929. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.
ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.