

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА В ЗАДАЧЕ N-ТЕЛ

Н.В.Куликова, А.В.Мышев, П.И.Игнатенко

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



В работе рассматривается методика компьютерного моделирования и метод исследования эволюции объектов в задаче N-тел (формализация модели, построение решения, обработка и анализ полученных результатов). На примере решения задач (пространственная гравитационная задача 4 и 6 тел) показывается уникальность и перспективность разрабатываемых подходов и методов при исследовании эволюции объектов динамической системы N-тел, взаимодействие между которыми обусловлено полями различной природы.

ВВЕДЕНИЕ

Изучению стохастической эволюции объектов системы N-тел в настоящее время уделяется большое внимание. Прогностические оценки поведения комплексов объектов в задаче N-тел, а также отдельных объектов ближнего и дальнего космоса требуются при решении многих задач как научного характера, так и прикладного. Качественные и количественные решения задачи N-тел, эволюция которой проявляет хаотическую динамику, невозможны без применения методов компьютерного моделирования. В связи с этим разрабатываются новые способы исследования компьютерных моделей, имитирующих эволюцию системы N-тел, и методы анализа и интерпретации полученных результатов.

Поведение классических гамильтоновых динамических систем во многих случаях изучается в рамках пространственной задачи N-тел и представляет как научный, так и прикладной интерес не только для классической механики, но и для других областей естествознания. Математическая модель рассматриваемой динамической системы N-тел, в этом случае формализуется эволюционным оператором в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными и краевыми условиями. Эволюционный оператор математической модели динамической системы N-тел представляет собой систему $6 \cdot N$ нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих взаимодействие гравитирующих тел, а также негравитационные эффекты, входящие в уравнения в виде дополнительных нелинейных членов. Такая система дифференциальных уравнений не имеет аналитического решения для гравитационной задачи при $N > 2$. В этих случаях эволюция системы N-тел и построение численных решений дифференциальных уравнений осуществляется методами компьютерного моделирования. Для получения решения исходная математическая модель аппроксимируется линейной разностной схемой, где нелинейный оператор дифференцирования заменяется линейным разностным оператором. Разностная схема при этом может описываться методами численно-

го интегрирования как детерминированными, так и стохастическими, используя аппарат теории цифровых фильтров [11]. Адекватность непрерывной и дискретной математических моделей, описывающих поведение одной и той же динамической системы, определяется с учетом наличия следующих типов ошибок. Во-первых, линейность разностной схемы приводит к накоплению ошибок интегрирования при численном интегрировании. Во-вторых, источником накопления ошибок является дискретность самой компьютерной модели, поскольку числовая разрядная сетка компьютера ограничена. Это приводит к накоплению ошибок округления при интегрировании на больших промежутках времени [9]. Поэтому перед началом компьютерного моделирования производится процедура согласования различных типов ошибок [3, 5].

Хаотическая динамика в системах такого рода проявляется в силу неопределенности начальных и краевых условий задачи, а также параметров системы. Причины появления неопределенностей также обусловлены стохастическим способом описания переменных и параметров реальной динамической системы при формализации ее модели. Кроме того, стохастические явления в поведении системы вызваны дискретной аппроксимацией модели и линейным характером разностного оператора, аппроксимирующего оператор дифференцирования, что приводит к накоплению глобальных и локальных ошибок различного характера при проведении вычислительных экспериментов. Динамические системы, математические модели которых в своей формализации имеют стохастическое описание гравитационных и негравитационных взаимодействий, также будут вносить дополнительную составляющую в хаотические колебания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая модель динамической системы N -тел задается эволюционным оператором и начальными условиями, определяющими состояние системы в момент времени t_0 . Задача состоит в том, чтобы получить наиболее полную информацию о состоянии системы в момент времени $t > t_0$ и об условиях, определяющих переход ее в это состояние.

Математические модели задачи N -тел могут быть формализованы следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}, t), \\ \mathbf{x}_1|_{t=t_0} &= \mathbf{x}_0, \\ \mathbf{x}_2 &: \mathbf{P}_1(t_0, \mathbf{x}_{2|t=t_0}), \\ \mathbf{y} &: \mathbf{P}_2(t, \mathbf{y}), \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{X} - вектор решений задачи (1); \mathbf{F} - вектор сил, описывающий гравитационное и негравитационное взаимодействие между телами системы; \mathbf{x}_1 - вектор детерминированных переменных; \mathbf{x}_2 - вектор стохастических переменных, координаты которых есть случайные скалярные величины; \mathbf{y}_1 - вектор стохастических параметров, которые включают в себе неопределенность некоторых параметров во времени, задаются функциями плотностей распределений вероятностей; \mathbf{P}_1 - вектор функций плотностей распределений вероятностей для значений координат \mathbf{x}_1 в момент времени t_0 ; \mathbf{P}_2 - вектор функций плотности распределения вероятностей для значений координат векто-

ра параметров \mathcal{Y}_1 в любой момент времени $t \geq t_0$. Суммарная размерность векторов \mathcal{X}_1 и \mathcal{X}_2 должна удовлетворять следующему соотношению [2]:

$$\dim \mathcal{X} = \dim \mathcal{X}_1 + \dim \mathcal{X}_2. \quad (2)$$

Траектории в фазовом пространстве позволяют дать только качественную картину состояния системы. Данный подход не позволяет проследить эволюцию системы наиболее подробно на всем заданном интервале времени. Состояние системы лучше характеризовать вероятностью ее нахождения в некоторой области метрического пространства переменных, параметров и времени, в котором строится решение системы (1) [3,5].

Поведение системы N-тел, формализуемой задачей (1), можно описать с помощью системы булевых вероятностных пространств (B_j^i, F_j^i, P_j^i) , где B_j^i - пространство исходов, координат тел системы; F_j^i - алгебра событий на B_j^i ; P_j^i - вероятностная мера, заданная на классе событий F_j^i ($i = \overline{1, N}; j = \overline{1, 6}$).

Во многих случаях, достаточно сложно и иногда невозможно построить вероятностные меры в пространствах (B_j^i, F_j^i, P_j^i) . Однако в задачах классической физики можно построить отображение исходного вероятностного пространства (B_j^i, F_j^i, P_j^i) в вероятностное пространство элементов кеплеровского движения (Y_j^i, G_j^i, R_j^i) . Переход от пространства переменных \mathcal{Y} и \mathcal{X} в пространство элементов кеплеровского движения a, e, i, ω, Ω представляет собой удобный вариант такого отображения и позволяет анализировать качественные и количественные изменения в эволюции системы N-тел. Y_j^i - точечное множество, определенное на кеплеровском пространстве элементов для i -ой координаты j -го тела системы; G_j^i - алгебра событий на Y_j^i ; R_j^i - вероятностная мера, заданная на G_j^i . Стохастический образ эволюции системы N-тел задачи (1) в этом случае будет описываться системой булевых вероятностных пространств (Y_j^i, G_j^i, R_j^i) .

При компьютерном моделировании поведения динамической системы, описываемой задачей (1), исходная математическая модель исследуется в рамках компьютерной динамической системы. Состояние компьютерной динамической системы в дискретные моменты времени t_k во время вычислительного эксперимента определяется системой дискретных булевых вероятностных пространств $(\hat{B}_j^i, \hat{F}_j^i, \hat{P}_j^i)$. \hat{B}_j^i - область изменения координат тел динамической системы. Стохастический образ эволюции тел системы на всем интервале интегрирования T , описывается другой системой дискретных булевых вероятностных пространств $(\hat{Y}_j^i, \hat{G}_j^i, \hat{R}_j^i)$. \hat{Y}_j^i - дискретное пространство изменения элементов кеплеровского движения. Отображение \hat{B}_j^i на \hat{Y}_j^i выполняется по известным формулам классической механики [7]. Построение решений задачи (1) в $(\hat{Y}_j^i, \hat{G}_j^i, \hat{R}_j^i)$ осуществляется по схеме Бернули [1] на основе методов Монте-Карло. Стохастическое поведение динамической системы N-тел исследуется методом вероятностных карт, который разработан А.В. Мышевым для исследования эволюции динамических систем и описан в [2]. Кратко опишем суть метода вероятностных карт.

Основная идея метода состоит в том, что плоскость изменения координаты пространства во времени $(e_j, 0, t)$ разбивается на «клеточные» множества. На рис.1 показано символическое изображение стохастического образа эволюции e_j координаты выборочного пространства на интервале времени $t \in [t_0, t_{\text{end}}]$. Этот рисунок также объясняет процедуру разбиения на «клеточные» подмножества области изменения e_j на интервале $t \in [t_0, t_{\text{end}}]$. Диапазон изменения j -элемента кеплеровского движения ограничен значениями e_{\min} и e_{\max} , это предельные значения, которые может принимать j -элемент на $[t_0, t_{\text{end}}]$. Величины e_{\min} и e_{\max} вычисляются или оцениваются до начала моделирования. Шаги дискретизации δe и δt выбираются на основе условий согласования $\delta e \leq G(\Delta t)$, где $G(\Delta t)$ – глобальная ошибка интегрирования на интервале $[t_0, t_{\text{end}}]$ при шаге интегрирования Δt , $\Delta t < \delta t$. Для дискретной модели область изменения вероятностной меры $P(e_j, t)$ разбивается на уровни квантования, т.е. на отрезки, с шагом квантования δP . Размер этого шага определяется длиной доверительного интервала оценки вероятностной меры $P(e_j, t)$ по частоте [8]. Все уровни квантования нумеруются от нуля и выше, т.е. каждый уровень имеет свой целочисленный номер. Тогда значения оценок $P(e_j, t)$ в любые моменты времени определяются целым числом согласно номеру уровня квантования, в который попадает ее относительная частота, который получаем символический целочисленный образ $P(e_j, t)$ в плоскости $(e_j, 0, t)$. Такой образ очень удобен и эффективен при компьютерном анализе состояний и эволюции динамической системы N -тел.

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанный подход формализации и исследования поведения системы (1) был применен для решения некоторых вариантов гравитационной задачи N -тел.

Компьютерное моделирование проводилось для $N=4$ и $N=6$, с различными динамическими характеристиками и параметрами тел. В этом случае уравнения системы (1) в системе координат, связанной с M_0 , имеют следующий вид [7]:

$$\frac{d^2 \rho_{i0}}{dt^2} = \gamma \left(-m_0 \frac{\rho_{i0}}{r_{i0}^3} + \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i, 0}}^{N-1} m_j \frac{\rho_{ij}}{r_{ij}^3} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 0}}^{N-1} m_j \frac{\rho_{j0}}{r_{j0}^3} \right), \quad (3)$$

$i=0, 1, \dots, N-1; i \neq 0,$

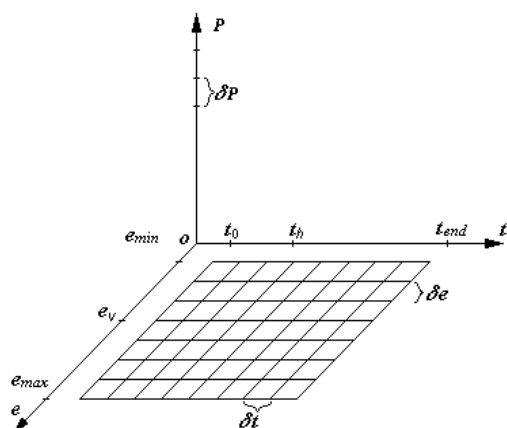


Рис. 1. Символическое изображение стохастического образа эволюции e_j координаты выборочного пространства на интервале времени $t \in [t_0, t_{\text{end}}]$

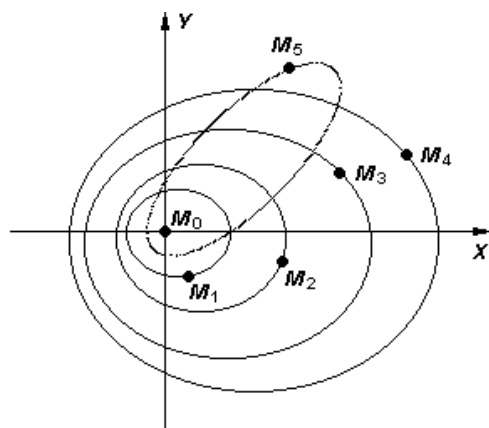


Рис. 2. Геометрия задачи

где m_j – массы тел, r_{ij} – взаимные расстояния, γ – гравитационная постоянная.

Геометрия задачи показана на рис.2. В рамках пространственной задачи 4-тел рассматривались следующие тела системы: M_0 , M_3 , M_4 , M_5 (рис.2). M_0 является центральным телом в системе, т.е. движение относительно него описывается оскулирующими элементами кеплеровского движения. За единицу измерения масс была выбрана масса тела M_0 , за единицу измерения времени – сутки, за единицу измерения расстояний – среднее расстояние между M_0 и M_1 . В выбранной системе единиц измерения массы тел m_j ($j=0..5$) принимают следующие значения: $m_0=1$, $m_1=3.04 \cdot 10^{-6}$, $m_2=3.72 \cdot 10^{-7}$, $m_3=9.55 \cdot 10^{-4}$, $m_4=2.86 \cdot 10^{-4}$, $m_5 \ll m_j$, ($j=0..4$). Элементы кеплеровских орбит для M_1 , M_2 , M_3 , M_4 на момент t_0 соответственно имеют следующие значения: $a_1 = 1.0$, $e_1 = 0.017$, $i_1 = 0.045^\circ$, $w_1 = 107.1^\circ$, $Q_1 = 355.5^\circ$; $a_2 = 1.52$, $e_2 = 0.093$, $i_2 = 1.88^\circ$, $w_2 = 283.93^\circ$, $Q_2 = 50.5^\circ$; $a_3 = 5.20$, $e_3 = 0.048$, $i_3 = 1.310^\circ$, $w_3 = 272.82^\circ$, $Q_3 = 99.79^\circ$; $a_4 = 9.56$, $e_4 = 0.056$, $i_4 = 2.481$, $w_4 = 341.0$, $Q_4 = 114.5$.

Интегрирование уравнений движения проводилось разновидностью одношаговой схемы Рунге-Кутты по алгоритму Эверхарда. Данный метод с адаптивным шагом интегрирования показал удовлетворительные результаты по точности и скорости счета. Для уменьшения влияния глобальной ошибки интегрирования весь интервал интегрирования (400 лет) разбивался на участки по 10 суток, и последовательно на каждом участке выполнялось интегрирование. Для проводившихся расчетов стохастической переменной была выбрана истинная аномалия v . Первичная область изменения стохастической переменной выбиралась произвольно, в данных расчетах эта область составляла $10^\circ v_0 \pm 5^\circ$, где v_0 точное значение на момент времени t_0 . Распределение вероятностей в области этой области принималось равномерным. Решение системы дифференциальных уравнений (1) с начальными стохастическими условиями $v_0 \pm 5^\circ$ строится методом Монте-Карло. В процессе интегрирования системы (1) заполняются статистические образы вероятностных карт для гелиоцентрических элементов a (большая полуось), e (эксцентриситет) и i (угол наклона орбиты). Шаги дискретизации для вероятностных карт этих элементов выбраны следующими: $\delta a = 0.1$ а.е., $\delta e = 0.01$, $\delta i = 1^\circ$, $\delta t = 100$ суток.

Кратко опишем схему расчета и заполнения статистических образов карт, которые представляют собой целочисленные матрицы размерности $p \times m$ по числу “клеточных” множеств (рис.1). При интегрировании уравнений движения (1) в дискретные моменты времени $t_k = t_{k-1} + \Delta t$ ($\Delta t = 10$ суток) имеем элементы кеплеровского движения изучаемого объекта e_{jk} . После этого увеличиваем значения соответствующих ячеек матриц, координаты ячеек v ($v \in 0..n-1$) и h ($h \in 0..m-1$) вычисляются на основе следующих неравенств: $e_{jv} \leq e_{jk} < e_{jv} + \delta e_j$, $t_h \leq t_k < t_h + \delta t$, где e_{jv} и t_h граничные значения “клеточных” множеств (рис.1). После заполнения матриц производится операция квантования частотной вероятности P .

Первый цикл расчетов проводился для исследования эволюции тела M_5 , когда данный объект в процессе своей эволюции имеет уникально-тесные сближения с M_3 . Расчеты проводились в рамках задачи 4-тел с учетом возмущений от M_3 и M_4 на протяжении 400 лет. Значения исходных элементов кеплеровского движения тела M_5 в эпоху 1660 взяты из [6], начальные координаты M_3 и M_4 также брались в эту эпоху. Варьирование начальными условиями тела M_5 в области $v \in 297.6^\circ \pm 5^\circ$ позволило выявить области регулярной (окрестность точки 300.0°) и хаотической динамики (окрестность точки 296.80°) и область выброса кометы на близко-параболические орбиты в окрестности точки 296.86° .

Для тела M_5 была определена топология начальных условий, для которой характерны следующие типы движений: регулярное движение $v \in 300.0^\circ \pm 0.001^\circ$, хаотическое движение $v \in 296.80^\circ \pm 0.001^\circ$ и выброс на близко-параболические ор-

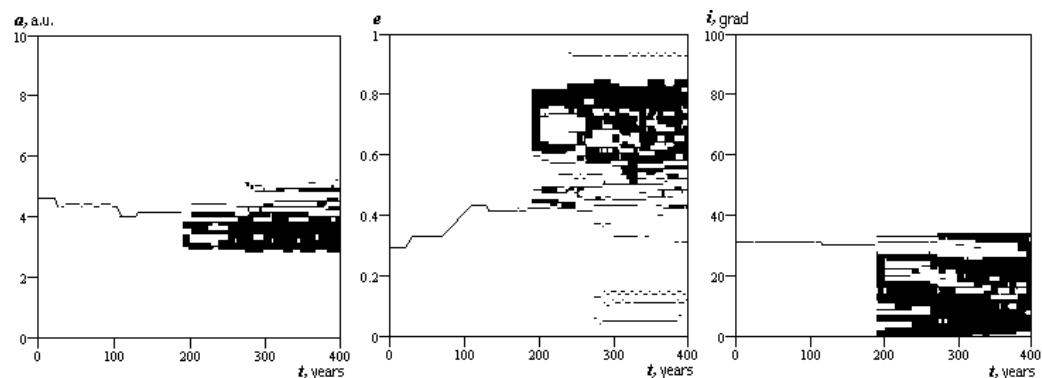


Рис. 3. Статистические образы эволюции хаотической области

биты $v \in 296.86 \pm 0.001^\circ$. Величина $\pm 0.001^\circ$ соответствует точности наблюдаемых данных. Статистические образы эволюции хаотической области представлены на рис.3, на этом и других рисунках черным цветом отмечены области ненулевого уровня квантования, а белым, соответственно, нулевого.

На данном рисунке видны области регулярного и хаотического движения (заштрихованные области), тенденции в изменении элементов, характерные моменты времени, определяющие резкие изменения элементов. В области хаотического движения наблюдаются запретные зоны (пустые зоны в хаотической области), что указывает на явную фрактальную структуру данного множества [2, 4]. На рис.4 представлен статистический образ эволюции кометы для топологии начальных условий, при которой происходит выброс на близко-параболические орбиты. Видны резкие увеличения a (большая полуось) и резкие изменения в e (эксцентриситет).

Также были проведены расчеты для объекта M_5 с другими начальными условиями, при которых данное тело имеет длительные (несколько лет) временные захваты его телом M_3 . Расчеты проводились в рамках задачи 4-х тел с учетом возмущений от M_3 и M_4 на протяжении 400 лет. Значения исходных элементов кеплеровского движения объекта M_5 в эпоху 1660 взяты из [6]. Варьирование начальными условиями M_5 в пределах $v \in 75^\circ \pm 5^\circ$ позволило выявить топологию начальных условий для регулярного и хаотического движения. Область хаотического движения имеет топологию начальных условий $v \in 75.0^\circ \pm 0.001^\circ$, а регулярного $v \in 79.67^\circ \pm 0.001^\circ$. На рис.5 и 6 представлены статистические образы эволюции элементов a , e , i для соответствующих топологий.

Также исследовалась эволюция тела M_5 для случая, когда в задаче (1) случайным параметром была масса M_3 . Вектор переменных X^μ детерминированный, т.е.

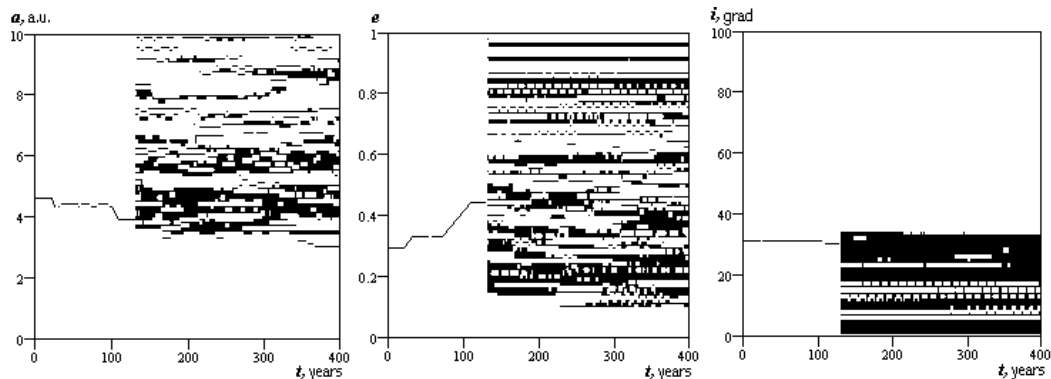


Рис.4. Статистический образ эволюции кометы для топологии начальных условий, при которой происходит выброс на близко-параболические орбиты

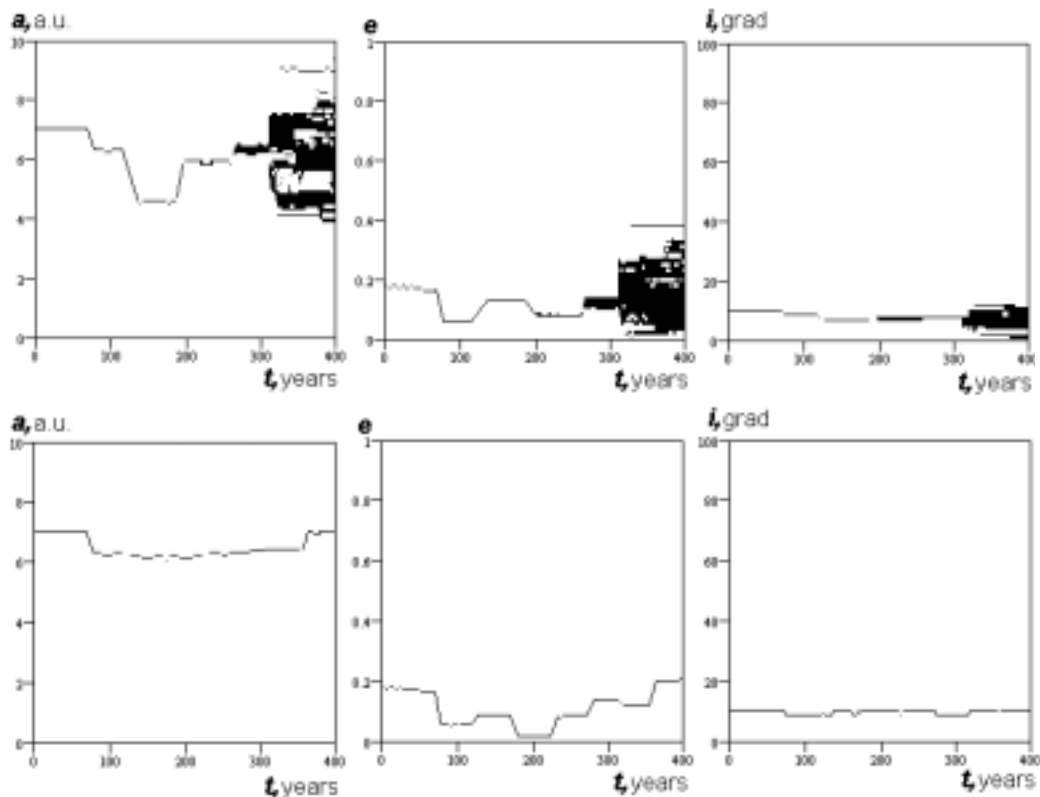


Рис.5, 6. Статистические образы эволюции элементов a , e , i для соответствующих топологий

все элементы кеплеровского движения орбиты заданны детерминировано на момент времени t_0 , $\dim \mathcal{X}_2=0$, стохастический параметр \mathcal{Y}_1 - масса M_3 , $\dim \mathcal{Y}_1=1$. Предполагалось, что масса является случайной величиной M_3 и задается равномерной плотностью

распределения на промежутке $M_3^{\text{ист}} \pm \frac{1}{100} M_3^{\text{ист}}$. Построение решения системы (1) выполнялось методом Монте-Карло при стохастическом задании параметра. Статистические образы эволюции элементов a , e , i тела M_5 представлены на рис.7. Видно, что система при таких начальных условиях и параметрах задачи также проявляет сложную динамику, для которой характерны зоны регулярного и хаотического движения.

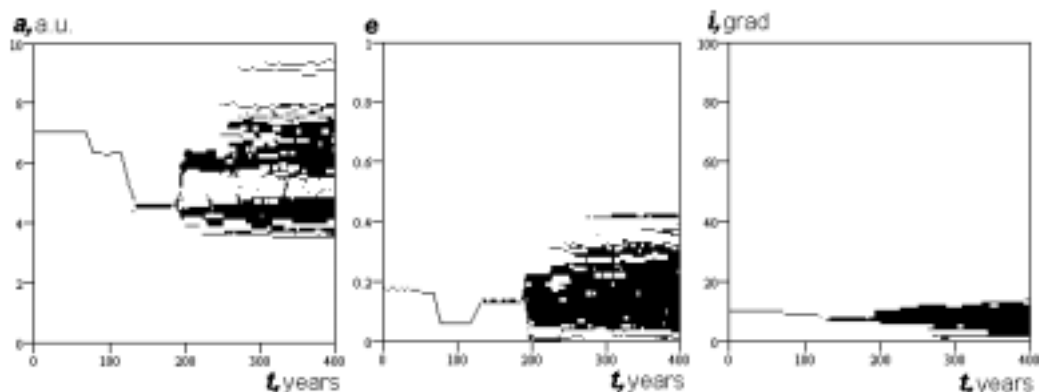


Рис.7. Статистические образы эволюции элементов a , e , i тела M_5

Последняя группа расчетов проводилась для исследования эволюции тела M_5 в рамках задачи 6-тел с учетом возмущений от M_1, M_2, M_3 и M_4 . Значения исходных элементов кеплеровского движения тела M_5 в эпоху 1882 взяты из [10]. При выбранных начальных условиях данный объект не имеет сближений с телами M_1, M_2, M_3 и M_4 на рассматриваемом промежутке времени 250 лет. Статистический образ эволюции элементов a, e, i для $v \in 165^\circ \pm 5^\circ$ представлен на рис.8. При заданных масштабах разбиения плоскости $(e_j, 0, t)$ $\delta a = 0.1$ а.е., $\delta e = 0.01$, $\delta i = 1^\circ$ эволюция элементов a, e, i не проявляет хаотической динамики на всем рассматриваемом интервале.

При уменьшении шагов дискретизации в 10 раз $\delta a = 0.01$ а.е., $\delta e = 0.001$, $\delta i = 0.1^\circ$ статистические образы более детально, точно описывают эволюцию элементов a, e, i (рис.9). Здесь видны локальные зоны хаотического и регулярного движения. На основе рассмотренных результатов можно сделать вывод, что именно тесные сближения с планетами могут приводить к хаотической динамике (см. рис. 3-7, 8), при уменьшении шагов дискретизации статистические образы вероятностных карт показывают более детально эволюцию системы (см. рис. 9).

Полученные результаты показывают сложное хаотическое поведение малых объектов в условиях сильных гравитационных возмущений при строго определенной топологии начальных условий и параметров системы. Приведенная здесь методика формализации модели и проведения вычислительного эксперимента позволяет по-новому описывать, семейства траекторий движения в условиях стохастического хаоса. Представляется, что эта методика перспективна для различных классов задач теории динамических систем как экспериментальной физики, так и теоретической.

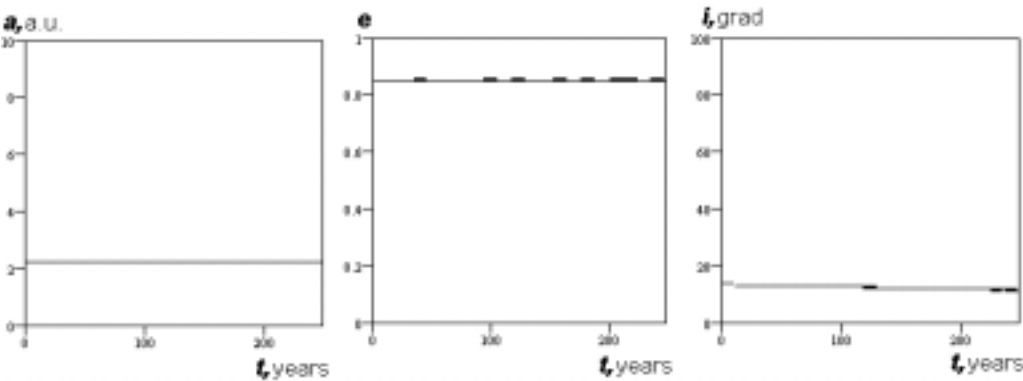


Рис.8. Статистический образ эволюции элементов a, e, i для $v \in 165^\circ \pm 5^\circ$

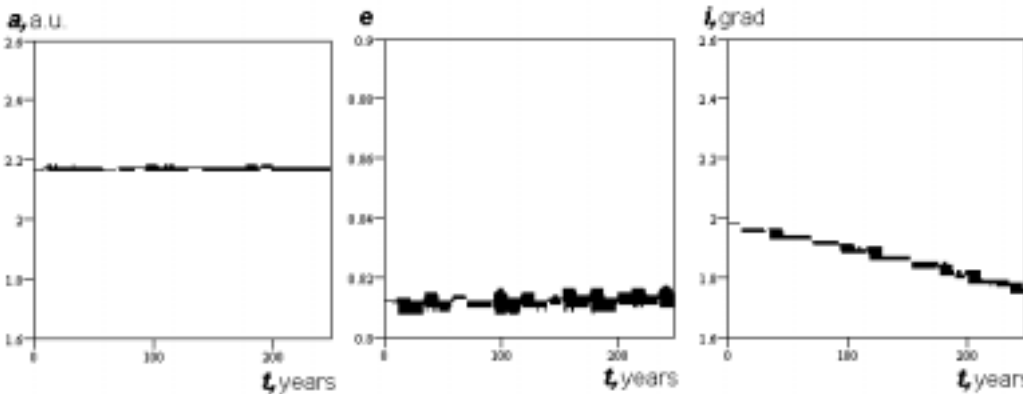


Рис.9. Эволюция элементов a, e, i при уменьшении шагов дискретизации в 10 раз

Несомненным преимуществом подобных дискретных методов анализа компьютерных моделей является простота представления решений систем дифференциальных уравнений в виде дискретных вероятностных карт. Поскольку данные структуры не сложно программировать, что важно на этапе отладки компьютерной модели, не малым преимуществом также является удобство хранения и возможность дальнейшего использования вероятностных карт, отражающих эволюцию системы (1), в виде целочисленных структур данных средствами современных вычислительных систем. Данные целочисленные дискретные стохастические образы легко сравнивать для проведения анализа взаимно изменяющихся параметров одной системы, так и разных систем. Анализ поведения динамической системы (1) в рамках компьютерной дискретной динамической системы позволяет выявить характерные этапы эволюции, а также условия и моменты времени определяющие эти этапы. В последующем можно динамическую систему формализовать несколькими математическими моделями, описывающими отдельные составляющие исходной динамической системы, и исследовать их по отдельности более подробно.

В дальнейшем представляется перспективным исследование дискретных динамических систем методом вероятностных карт на основе теории фрактальных размерностей, что позволит определять условия перехода от стационарного движения к хаотическому, ширину полосы и степень хаоса, тип хаоса - детерминированный или стохастический, условия выхода из хаоса, определять топологии начальных условий, приводящих к хаотическим колебаниям системы. Фрактальные образы вероятностных карт позволяют определить тенденции в поведении системы в условиях стохастического хаоса.

Работа поддержана грантом РФФИ №990217259.

Список литературы

1. Куликова Н.В., Мышев А.В., Чепурова В.М. Стохастическая динамика малых тел солнечной системы // Известия РАН. Серия физическая. – 1998. - Т.62. - Вып. 9. - С. 1902-1906.
2. Мышев А.В. Порядок, хаос и фракталы в небесномеханических системах // Известия РАН. Серия физическая. – 1998. - Т.62. - Вып. 9. - С. 1907-1913.
3. Мышев А.В. Вероятностно-статистическое моделирование процессов образования новых классов малых тел в космическом пространстве (вычислительные эксперимент). Дисс. на соиск. учен. степ. канд. ф.-м. наук, Москва, МГУ, 1995, 169 с.
4. Мышев А.В. // Тез. докл. научной конфер. «Новые теоретические и практические задачи небесной механики», ГАИШ МГУ, 1997. с.56.
5. Куликова Н.В., Мышев А.В., Пивненко Е.А. Космогония малых тел. - М.: Космосинформ, 1993. - 175 с.
6. Казимирчак-Полонская Е.И. Эволюция орбит короткопериодических комет на интервале 1660-2060 гг. и роль внешних планет в этой эволюции // Астрономический журнал. – 1967. - Т. 44. - № 2. - С.439-460.
7. Справочное руководство по небесной механике и астеродинамике / Под ред. Дубошина Г.Н. - М.: Наука, 1976. - 800 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1964. - 375 с.
9. Thomas Quinn and Scott Tremaine Roundoff error in long-term planetary orbit integrations // Astronomical Journal. – 1999. – V.99. - №3. - P.1016-1023.
10. Belyaev N.A., Kresak L., Pittich E.M., Pushkarev A.N. Catalogue of short-period comets., Bratislava, 1996.
11. Пугачев В.С., Синицын И.Н. Стохастические дифференциальные системы. - М.: Наука, 1985. - 560 с.

Поступила в редакцию 20.05.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.311.25:621.039.004(55)

Scenarios of Development of Nuclear Power Engineering on BB3P-1000 and BREST-type Fast Reactors in Iran \N. Mataji Kajuri; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 8 pages, 2 tables, 8 illustrations. - References, 5 titles.

The different scenarios of development of Iranian nuclear power engineering are considered. A possibility of BREST-type lead-cooled fast reactors introduction in the Iranian nuclear industry is analyzed.

УДК 621.311.25:621.039

Management of Technical and Industrial Hazards on Objects of Nuclear Power Engineering Using the Automated System of Recording and Documenting of Signals \V.V. Titov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 8 pages, 2 illustrations.

The opportunities of application of the multifunctional automated systems of recording of signals on high-hazard industrial objects, including nuclear power engineering are uncovered in the paper.

УДК 523.683:523.64

Chaotic Dynamics in a Problem of N-bodies \N.V. Kulikova, A.V. Mishev, P.I. Ignatenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 9 illustrations. - References, 11 titles.

The technique of realization of computer modeling and research method of the evolution of objects in the N-bodies problem (formalization of the model, construction of the solution, processing and analysis of results) is considered. Using examples of the decision of spatial gravitational problems for 4 and 6 bodies it was shown that the developed approaches and methods are unique for the research of the evolution of N-bodies dynamic system interaction is caused by fields of a various nature.

УДК 504.3.054:681.7.069.24

The Possibilities of Sondage of Contaminants in the Real Atmosphere Using Industrial Lasers \M.M. Troyanov, Yu.D. Il'ichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. - References, 9 titles.

The possibilities of instrumental determination of adsorbing admixtures in a real atmosphere by the method of differential absorption using isotope CO₂-lasers are investigated.

УДК 51-73:504.054

Prediction of Contaminations of Surface Stratum of Territory in Region NPP \K.M. Efimov, E.A. Yas'ko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 4 pages, 1 illustration. - References, 4 titles.

Development of mathematical models of pollution spreading due to natural processes in the soil is hampered by the complexity of representing the soil as a medium of migration owing to heterogeneity of its physicochemical properties and insufficient knowledge of transfer mechanisms. This study offers rather a simple mathematical model of both the formation of rainfall run-off at a catchment area, and the process of transfer of polluting substances by the generated flow. The constructed model is convenient for practical application. Numerical calculations for the Covashy river basin (vicinity of the Leningrad Nuclear Power Plant) have been carried out.

УДК 551.510.42

Removing of Aerosol Fraction from the Troposphere by Atmospheric Precipitation \M.M. Troyanov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 4 pages. - References, 9 titles.

The problem of removal of an aerosol from the atmosphere by clouds is considered. Two different mechanisms of an aerosol removing - at the expense of aerosol moisturing inside clouds and due to