

# Начальные данные и результаты интегрирования дифференциальных уравнений движения планет Солнечной системы, Луны и Солнца при взаимодействии их по закону тяготения Ньютона: папка OrbtData

## 1. Описание папок: DbPr00-50M, DP-50-100M, ExPr20-26с, ExPr36-34с.

1.1. Из четырех папок: DbPr00-50M, DP-50-100M, ExPr20-26с и ExPr36-34с в первых двух содержатся результаты интегрирования, выполненные с двойной точностью (17 десятичных знаков в числе) и шагом интегрирования  $dT = 10^{-4}$  года, а в последних двух – с расширенной длиной числа (34 десятичных знака) и шагом интегрирования  $dT = 10^{-5}$  года.

1.2. В папке DbPr00-50M представлены результаты расчетов за 50 млн. лет. В нее входят папка OrPr-50 с параметрами орбит, файл o1p17m с контрольными результатами и архивированные файлы RzIn-50M.part01.rar с координатами, скоростями и др. параметрами тел Солнечной системы через 10 тыс. лет.

В папке OrPr-50 содержится девять файлов O-50m1d.prn и другие с параметрами орбит от Меркурия до Плутона, которые отмечены цифрами от 1 до 9 в именах файлов. Десятый файл sn49f.dat – файл начальных данных по первому варианту.

В архивах RzIn-50M.part01.rar содержатся файлы с именами 0, 1, 2, ..., 5009, в которых представлены положения тел Солнечной системы и другие их характеристики через 10 тыс. лет. При этом в файле с именем "0" содержатся данные на начальную эпоху 30.12.1949г. Номер файла соответствует количеству проинтегрированных отрезков времени по 10 тыс. лет.

1.3. В папке DP-50-100M представлены результаты расчетов на интервале 50-100 млн. лет. В нее входит папка OrPr-100 с параметрами орбит, файл o100p08m с контрольными результатами и архивированные файлы RzI-100M.part01.rar с положениями тел Солнечной системы через 10 тыс. лет.

В папке OrPr-100 содержатся девять файлов O-100m1d.prn и другие с параметрами орбит от Меркурия до Плутона, которые отмечены цифрами от 1 до 9 в именах файлов. В архивах RzI-100M.part01.rar содержатся файлы с именами 5010, 5011, ..., 10008, в которых представлены положения тел Солнечной системы и другие их характеристики через 10 тыс. лет. Эти файлы представляют непрерывное продолжение результатов интегрирования дифференциальных уравнений движения (3) за 50 млн. лет.

1.4. В папке ExPr20-26с находятся файлы с номерами 1, 2, ..., 24, которые представляют положение тел Солнечной системы через 200 лет. Они получены при интегрировании с расширенной длиной числа и с первым вариантом начальных данных. Четыре файла O1e-7P1.prn и другие представляют параметры орбит от Меркурия до Марса на интервале от +2 тыс. лет до -2.6 тыс. лет. Здесь же находится файл начальных данных по первому варианту sn49f.dat и файл op20-24с с контрольными результатами.

1.5. В папке ExPr36-34с находятся файлы с номерами 1, 2, ..., 36, которые представляют положение тел Солнечной системы через 200 лет. Они получены при интегрировании с расширенной длиной числа и со вторым вариантом начальных данных. Девять файлов O2e-7cp1.prn и другие представляют параметры орбит от Меркурия до Плутона на интервале от 3.6 тыс. лет. Здесь же находятся файлы начальных данных по второму варианту sn49jplc.dat и файл op36-34с с контрольными результатами.

## 2. Описание файлов.

### 2.1. Дифференциальные уравнения движения тел Солнечной системы.

Файлы начальных условий и результатов интегрирования даны в безразмерных величинах, которые получены в результате приведения дифференциальных уравнений к безразмерному виду. Поэтому вначале опишем эти уравнения [1-6]:

Согласно закону всемирного тяготения тело с номером  $k$  притягивает тело с номером  $i$ , и это притяжение выражается силой:

$$\vec{F}_{ik} = -G \frac{m_i m_k}{r_{ik}^3} \vec{r}_{ik}, \quad (1)$$

где  $G$ -гравитационная постоянная;

$\vec{r}_{ik}$  -радиус-вектор от тела с массой  $m_k$  до тела с массой  $m_i$ .

Если количество тел равно  $n$ , то на  $i$ -е тело остальные будут оказывать воздействие с суммарной силой

$$\vec{F}_i = -G m_i \sum_{k \neq i}^n \frac{m_k \vec{r}_{ik}}{r_{ik}^3}. \quad (2)$$

Под воздействием, выраженным силой (2), в соответствии со вторым законом механики  $\vec{a} = \vec{F} / m$ ,  $i$ -ое тело будет двигаться относительно инерциальной (неускоренной) системы отсчета с ускорением

$$\frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = -G \sum_{k \neq i}^n \frac{m_k \vec{r}_{ik}}{r_{ik}^3}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где  $\vec{r}_i$  радиус-вектор тела  $m_i$  относительно некоторого центра в инерциальной системе координат (в дальнейшем относительно центра масс Солнечной системы).

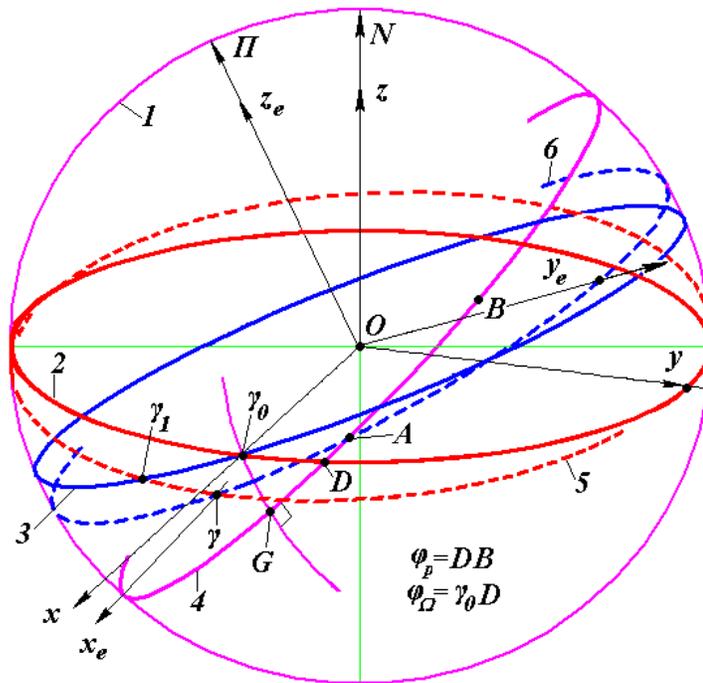


Рис. 1. Параметры орбиты планеты в неподвижной экваториальной  $x, y, z$  системе координат.

1 – небесная сфера; 2 – плоскость экватора Земли на эпоху  $JD_s$ ; 3 – плоскость орбиты Земли на эпоху  $JD_s$  (плоскость эклиптики); 4 – плоскость орбиты планеты в эпоху  $T$ ; 5 – плоскость экватора Земли в эпоху  $T$ ; 6 – плоскость орбиты Земли в эпоху  $T$  (наклон для наглядности увеличен);  $N$  – северный полюс мира (полюс неподвижного экватора 2);  $\Pi$  – северный полюс подвижной эклиптики 6;  $\gamma_0$  – точка весеннего равноденствия в эпоху  $JD_s$ ;  $\gamma$  – точка на линии пересечения подвижного экватора в эпоху  $T$  с подвижной эклиптикой (точка весеннего равноденствия в эпоху  $T$ );  $\gamma_0 G$  –

дуга большого круга, перпендикулярного плоскости орбиты планеты;  $B$  – гелиоцентрическая проекция перигелия планеты на небесной сфере;  $A$  – восходящий узел орбиты планеты на подвижной эклиптике;  $D$  – восходящий узел орбиты планеты на неподвижном экваторе; параметры орбиты планеты в гелиоцентрической экваториальной неподвижной системе:  $\varphi_\Omega = \gamma_0 D$ ;  $\varphi_p = DB$ ;  $i = \angle \gamma_0 DG$ ; и в подвижной эклиптической системе:  $\Omega_a = \gamma A$ ;  $\omega_a = AB$ ;  $\pi_a = \gamma A + AB = \Omega_a + \omega_a$ ;  $i_e = \angle \gamma AG$ . Эпоха системы координат  $JD_s$  определяется номером юлианского дня, например,  $JD_{S1} = 2433282.4234$  (1950.0 г.); эпоха  $T$  определяется в сидерических столетиях от начала эпохи отсчета времени  $JD_0$ , например,  $JD_0 = 2433280.5$  (30.12.1949г.).

Соотношение (3) представляет систему  $3n$  нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, где  $n = 11$  (девять планет, Солнце и Луна). Для ее решения мы задаем  $3n$  значений координат и  $3n$  значений компонент скорости на определенную дату, которую в дальнейшем будем называть начальной эпохой с  $T_0 = 0$ , например, на эпоху 30.12.1949 г. с номером юлианского дня  $JD_0 = 2433280.5$ . Задача решается в неподвижной барицентрической экваториальной системе координат  $(x, y, z)$  (см. рис 1), ось  $x$  которой направлена на точку весеннего равноденствия  $\gamma_0$  эпохи неподвижной системы координат, например, на эпоху 1950.0 г. с номером юлианского дня  $JD_{S1} = 2433282.4234$ .

Дифференциальное уравнение (3) представлено в неускоренной (инерциальной) системе координат. Однако все тела движутся с ускорением, и в системе взаимодействующих тел неподвижной является только их центр масс  $C$  (при условии, что пренебрегается воздействие других тел на рассматриваемую систему тел). Как правило, из наблюдений получают в начальный момент координаты  $x_{Si}$ ,  $y_{Si}$ ,  $z_{Si}$  и скорости  $v_{xSi}$ ,  $v_{ySi}$ ,  $v_{zSi}$  относительно Солнца ( $S$ ). С их помощью определяют координаты и скорости центра масс Солнечной системы, которые в проекции на ось  $x$  имеют вид:

$$X_C = \sum_{i=1}^n m_i x_{Si} / M_{Ss}; \quad V_{xC} = \sum_{i=1}^n m_i v_{xSi} / M_{Ss}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество тел Солнечной системы;  $M_{Ss} = \sum_{i=1}^n m_i$  – масса Солнечной системы.

Координаты и скорости тел относительно центра масс  $C$  в проекции на ось  $x$  будут:

$$x_{Ci} = x_{Si} - X_C; \quad v_{xci} = v_{xSi} - V_{xC}. \quad (5)$$

Уравнение (3) интегрируется в безразмерном виде, который для проекции  $x$  выглядит так [1]:

$$\frac{dv_{xi}}{dT} = - \sum_{k \neq i}^n \frac{m_{oi}(x_i - x_k)}{R_{ik}^3}, \quad (6)$$

где  $x_i = x_{Ci} / Am$  – безразмерная координата  $i$ -того тела;  $Am$  – характерная длина Солнечной системы, близкая к половине ее диаметра. В нашем случае величину  $Am$  определяем так, чтобы безразмерное время  $T$  было в сидерических столетиях.

$m_{oi} = m_i / M_{Ss}$  – безразмерная масса  $i$ -того тела;

$R_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}$  – безразмерное расстояние между  $i$ -тым и  $k$ -

тым телом;

$v_{xi} = v_{xci} k_v$  – безразмерная скорость  $i$ -того тела;

$k_v = \sqrt{\frac{Am}{G \cdot M_{Ss}}}$  – коэффициент скорости в сек/м;

$T = t k_t$  – безразмерное время в сидерических столетиях по 36525.636042 дней в столетии;

$k_t = \sqrt{\frac{G \cdot M_{Ss}}{Am^3}}$  – коэффициент времени в сид. ст./сек.

Во всех расчетах время  $T$  отсчитывалось от эпохи 30.0 дек. ЕТ 1949 г.,  $JD_0 = 2433280.5$ , гравитационная постоянная  $G = 6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$ . В первом варианте начальных условий, файл sn49f.dat, величины имели следующие значения:  $M_{Ss} = 1.991787350282 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ ,  $Am = 1.09796077030958 \cdot 10^{13} \text{ м}$ ,  $k_v = 2.874251102012487 \cdot 10^{-4} \text{ сек/м}$  и применялась экваториальная система координат на эпоху 1950.0,  $JD_{S1} = 2433282.4234$ . Во втором варианте начальных условий, файл sn49jplc.dat, величины имели следующие значения:  $M_{Ss} = 1.991588300600763E \cdot 10^{30} \text{ кг}$ ,  $Am = 1.097924194112168 \cdot 10^{13} \text{ м}$ ,  $k_v = 2.874346854684925 \cdot 10^{-4} \text{ сек/м}$  и применялась экваториальная система координат на эпоху 2000.0,  $JD_{S2} = 2451545$ .

## 2.2. Файлы начальных условий и результатов интегрирования:

sn49f.dat, sn49jplc.dat и файлы: 1, 2, 3 и т.д.

При описании файлов будем использовать два вида обозначения данных. Первый вид применяется в программах, а второй вид – в печатных материалах. Файл начальных условий типа sn49f.dat или sn49jplc.dat, а также файл результатов с именами 1, 2, 3 и т.д. включает 24 числа:  $T_0$ ,  $omm$ ,  $Um$ ,  $dTr$ ,  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ,  $AM_x$ ,  $AM_y$ ,  $AM_z$ ,  $Sps_x$ ,  $Sps_y$ ,  $Sps_z$ ,  $E$ ,  $E_m$ ,  $E_{tt}$ ,  $dT$ ,  $i2b$ ,  $j2b$ ,  $k2b$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $Mu$ , которые являются общими для всех взаимодействующих тел. Затем следуют пятнадцать чисел для каждого  $k$ -ого тела:  $om(k)$ ,  $(X(k,q), q=1,3)$ ,  $(U(k;q), q=1,3)$ ,  $(dUp(k;q), q=1,3)$ ,  $(Sp(k;q), q=1,3)$ ,  $Ra(k)$ ,  $Et(k)$ . Здесь  $q$  – индекс перечисления переменных по трем координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Общие параметры представляют собой следующее:

$T_0$  – время в сидерических столетиях по 36525.636042 дней в столетии;

$omm$  – максимальная масса, отнесенная к массе всех тел;

$Um$  – максимальная скорость;

$dTr$  – шаг по времени в сидерических столетиях на предыдущем шаге счета;

$P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  – составляющие количества движения всей системы тел;

$AM_x$ ,  $AM_y$ ,  $AM_z$  – составляющие моменты количества движения всей системы тел;

$Sps_x$ ,  $Sps_y$ ,  $Sps_z$  – составляющие суммы моментов количеств движений от собственного вращения тел вокруг своих осей (проекции спинов);

$E$  – суммарная кинетическая энергия всех тел в данный момент  $T_0$ ;

$E_m$  – максимальная кинетическая энергия всех тел от начала интегрирования;

$E_{tt}$  – кинетическая энергия всех тел, которую они приобрели при слиянии в результате столкновения;

$dT$  – текущий шаг по времени в сидерических столетиях;

$i2b$ ,  $j2b$ ,  $k2b$  – количества делений массива с веществом по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;

$A$ ,  $B$ ,  $C$  – размеры этого массива по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;

$Mu$  – число промежутков массива по оси  $x$ .

Последние семь параметров используются при задании взаимодействующих тел в виде массива распределенного в пространстве вещества.

Параметры для каждого тела представляют собой следующие:

$om(k) \div m_{oi}$  – безразмерная масса  $k = i$ -того тела;

$(X(k,q), q=1,3) \div x_i, y_i, z_i$  – безразмерные барицентрические экваториальные координаты  $i$ -тела;

$(U(k,q), q=1,3) \div v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$  – безразмерные скорости  $k = i$ -того тела;

$(dUp(k,q), q=1,3) \div x_i^{(5)}, y_i^{(5)}, z_i^{(5)}$  – безразмерные производные пятого порядка  $k = i$ -того тела;

$(Sp(k,q), q=1,3) \div S_{pxi}, S_{pyi}, S_{pzi}$  – безразмерные моменты количества движения (спины) от собственного вращения  $k = i$ -того тела, которые появились у тела, если оно образовалось слиянием других тел в результате их взаимодействия. Изначально вращение тел не учитывается, а их спины  $S_{pxi}=S_{pyi}=S_{pzi}=0$ ;

$Ra(k)$  – безразмерный эквивалентный радиус  $k = i$ -того тела;

$Et(k) – E_{ii}$  – безразмерная тепловая энергия  $k = i$ -того тела, которая возникла при слиянии нескольких тел в одно.

Изначально тепловая энергия тел не учитывается и  $E_{ii}=0$ . При слиянии тел с массами  $m_{oi}$  и  $m_{ok}$  тепловая энергия слившегося тела определяется по формуле:

$$E_{ii} = \frac{m_{ok} m_{oi} v_{rki}^2}{2(m_{ok} + m_{oi})}, \quad (7)$$

где  $m_{oi} \geq m_{ok}$ , а  $v_{rki}$  – безразмерная радиальная скорость тела с массой  $m_{ok}$  относительно тела с массой  $m_{oi}$ .

Следует отметить, что после слияния масса  $i$ -того тела увеличивается:  $m_{oi} + m_{ok}$ , а  $k$ -того тела приравнивается нулю.

### 2.3. Файлы параметров орбит:

O2e-7cp1.prn, O1e-7Pl1.prn, O-50ml1d.prn и O-100m1d.prn

Эти файлы содержат, в основном, 12 параметров, хотя в некоторых папках имеются отличия. Все эти файлы имеют расширение .prn и окончательный их вид подготовлен в пакете MathCad. Они состоят из следующих величин:

T2, fi01, dl1, fir, fia, Rp, Ra, Tr, Ta, Year, AMSA, zoa.

Величины представляют следующее:

T2 =  $0.5(T_s + T_f)$  – время в сидерических столетиях, соответствующее средней точке орбиты,

где  $T_s$  и  $T_f$  – время первой и последней точек, соответственно, исследуемой орбиты.

fi01 =  $\varphi_{\Omega}$  - положение восходящего узла орбиты (см. рис. 1), которое отсчитывается по кругу неподвижного экватора от точки весеннего равноденствия  $\gamma_0$ ;

dl1 =  $i$ - угол наклона плоскости орбиты к плоскости неподвижного экватора;

fir – угол положения по орбите наименьшего расстояния между планетой и Солнцем;

fia – угол положения наибольшего расстояния между планетой и Солнцем.

Первоначально углы наименьшего и наибольшего расстояний в обозначении fir0 и fia0 программой определения параметров траектории (DefTra) рассчитываются в рамках цикла от 0 до  $2\pi$ . Углы fir и fia представлены после пересчета fir0 и fia0 в среде MathCad в непрерывный ряд.

Rp – безразмерный радиус перигелия;

Ra – безразмерный радиус афелия;

Tr – время достижения перигелия;

Ta – время достижения афелия;

Year =  $T_m$  – период обращения планеты в сидерических годах относительно неподвижной системы координат. Он рассчитывается по следующей формуле:

$$T_m = T_n - T_1 + \frac{2\pi - \varphi_n}{\varphi_{n+1} - \varphi_n} (T_{n+1} - T_n), \quad (8)$$

где  $T_1$  – время нахождения планеты в первой точке орбиты;  $T_n$  – момент нахождения планеты в одной из последних точек орбиты, когда полярный угол  $\varphi_n$  не превосходит  $2\pi$ ;  $\varphi$  – полярный угол в средней плоскости орбиты, отсчитываемый от первой ее точки. При этом количество точек на исследуемой орбите задается так, чтобы они представляли полный оборот с некоторым запасом.

Формулой (8) выражена интерполяция между токами орбиты при переходе угла  $\varphi$  через  $2\pi$ . Аналогичная интерполяция используется при определении других параметров. Как правило, исследуются орбиты, представленные несколькими тысячами точек.

AMSA =  $Mpf = \sqrt{Mpx^2 + Mpy^2 + mpz^2}$  – средний за период обращения безразмерный момент количества движения планеты, а  $Mpx$ ,  $Mpy$ ,  $mpz$  – его проекции на оси координат. zoa =  $z_0$  – относительная толщина, в которой расположены точки орбиты. Величина  $z_0$  определяется следующим образом:

$$z_0 = (z_{\max} - z_{\min}) / (Ra + Rp), \quad (9)$$

где  $z_{\max}$  – наибольшее отклонение точек орбиты от ее средней плоскости;  $z_{\min}$  – наименьшее отклонение точек орбиты от ее средней плоскости, при этом  $z_{\min} < 0$ .

По представленным выше параметрам определяется средний угол перигелия:

$$\varphi_p = (fir + fia \pm \pi) / 2, \quad (10)$$

и эксцентриситет орбиты:

$$e = (Ra - Rp)/(Ra + Rp). \quad (11)$$

Перечисленные 12 параметров имеются в файлах O2e-7cp1.prn и др. папки ExPr36-34c. В файлах O1e-7P11.prn и др. папки ExPr20-20c отсутствует параметр zoa.

В папках расчетов на 50 млн. лет и 100 млн. лет: DbPr00-50M и DP-50-100M файлы параметров орбит O-50ml1d.prn и др. и O-100ml1d.prn и др., соответственно, содержат 14 параметров. Дополнительные два параметра fir0 и fia0 являются неприведенными углами перигелия и афелия, соответственно. Вследствие возвратных движений перигелия и циклического вида данных fir0 и fia0, алгоритм их приведения в непрерывные значения fir и fia очень сложный и возможны сбои, которые трудно проконтролировать на интервалах времени счета в 50 млн. лет и более. Поэтому в указанных выше файлах дополнительно приведены значения fir0 и fia0.

#### 2.4. Файлы контрольных результатов: op20-24c, op36-34c, o1p17m и o100p08m

В разработанной нами программе Galactica, при сближении тел на расстояние, равное сумме их радиусов, они объединяются в одно тело, которое приобретает суммарную тепловую энергию и собственный момент количества движения. В программе контролируются интегральные величины (см. рис. 2): наибольшая масса  $om_{max} = m_{max}$ , количество движения  $P$ , момент количества движения  $M$ , сумма собственных моментов количества движения  $S$ , кинетическая  $E$ , тепловая энергия  $E_t$  всей совокупности тел и относительное изменение ( $\delta M_z$ ) проекции момента  $M$  на ось  $z$ . При отсутствии внешних воздействий момент количества движения системы, например в проекции на ось  $z$ ,

$$M_z = \sum_{i=1}^n m_i(v_{yi} x_i - v_{xi} y_i) = \text{const}, \quad (12)$$

не должен изменяться. Поэтому относительное изменение момента

$$\delta M_z = (M_z - M_{z0})/M_{z0}, \quad (13)$$

где  $M_{z0}$  – величина момента количества движения в начальный момент времени, должно быть равно нулю. Если его значение не равно нулю, то это свидетельствует о погрешностях при численном интегрировании задачи. Остальные интегральные параметры характеризуют развитие системы.

1.000000000000000E-010	9.986599585707880E-001	15.262213869302140
1.000000000000000E-010	1.734723475976807E-018	-1.084202172485504E-018
2.422673047824909E-018	1.081760992678619E-005	-1.606331142603044E-004
3.791217242035128E-004	0.000000000000000E+000	0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000	8.608432591162210E-003	8.608432591162210E-003
0.000000000000000E+000	1	1.000000000000000E-007
0.000000000000000E+000		

*Значения параметров*

*Юпитер*

*T, m<sub>max</sub>, v<sub>max</sub>, dT<sub>p</sub>, P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>z</sub>, M<sub>x</sub>, M<sub>y</sub>, M<sub>z</sub>, S<sub>x</sub>, S<sub>y</sub>, S<sub>z</sub>,*

*E, E<sub>max</sub>, E<sub>t</sub>, L<sub>t</sub>, dT, δM<sub>z</sub>*



Рис. 2. Представление на экране дисплея (вид с южного полюса) результатов численного интегрирования системы уравнений (3). Курсивом даны пояснения и расшифровка числовых параметров.

При решении задачи на персональном компьютере, через определенное число шагов интегрирования уравнений, на экран дисплея выдается численная информация о

процессе интегрирования и картина положения планет с векторами скорости (см. рис. 2). Эти данные позволяют наблюдать процесс решения и качественно определять его достоверность. При решении на суперкомпьютере в выходной файл выдается только численная информация. При этом первые 16 параметров повторяют значения общих параметров:

TO, omm, Um, dTr, P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>z</sub>, AM<sub>x</sub>, AM<sub>y</sub>, AM<sub>z</sub>, Sps<sub>x</sub>, Sps<sub>y</sub>, Sps<sub>z</sub>, E, Em, Ett,

файлов начальных условий и результатов интегрирования в п. 2.2. Оставшиеся три параметра представляют номер шага интегрирования  $Lt$ , его величину  $dT$  и изменение  $\delta M_z$  момента количества движения в проекции на ось  $z$  (следует отметить, что полный номер шага интегрирования состоит из произведения  $Lt \cdot Lt2$ ).

Эти величины, собранные в одном файле **контрольных результатов**, позволяют легко анализировать эволюцию системы и процесс интегрирования уравнений (3). В файлах с расширенной длиной числа: op20-24c и op36-34c приведены значения за весь промежуток времени решения задачи. В файлах с двойной длиной числа даны значения за первый и последний отрезки времени: в файле o1p17m – за первые 1.17 млн. лет, а в файле o100p08m – за последние 1.5 млн. лет.

### Литература

1. Смутьский И.И. Теория взаимодействия. - Новосибирск: Из-во Новосиб. ун-та, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999 г. - 294 с. [http://www.ikz.ru/~smulski/TVfulA5\\_2.pdf](http://www.ikz.ru/~smulski/TVfulA5_2.pdf).
2. Мельников В.П., Смутьский И.И., Кротов О.И., Смутьский Л.И. Орбиты Земли и Солнца и возможные воздействия на криосферу Земли (постановка проблемы и первые результаты)// Криосфера Земли. - 2000, т. IV, №3, с. 3-13. <http://www.ikz.ru/~smulski/smull1/Russian1/IntSunSyst/OrZS.pdf>.
3. Мельников В. П., Смутьский И.И. Астрономические факторы воздействия на криосферу Земли и проблемы их исследования// Криосфера Земли. – 2004. – Т. VIII, № 1, с. 3–14. <http://www.ikz.ru/~smulski/smull1/Russian1/IntSunSyst/Astrfak7.htm>.
4. Гребеников Е.А., Смутьский И.И. Эволюция орбиты Марса на интервале времени в сто миллионов лет / Сообщения по прикладной математике. Российская Академия Наук: ВЦ им. А.А. Дородницына. М.: ВЦ РАН А.А. Дородницына. – 2007. 63 с. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvMa100m4t2.pdf>.
5. Смутьский И.И. Новая геометрия эволюции орбит // Proceeding of Joint International Scientific Conference “New Geometry of Nature, August 25 – September 5, 2003. Vol. III. Astronomy. Education. Philosophy. Kazan State University, 2003. – с. 192-195. <http://www.ikz.ru/~smulski/smull1/Russian1/IntSunSyst/NeGeEv2.doc>.
6. Смутьский И.И. Расчет взаимодействий в Солнечной системе за 50 млн. лет для изучения эволюции климата//«Большая Медведица». Журнал проблем защиты Земли. – Межрегиональный общественный фонд им. Ломоносова. Новосибирск, Россия.– 2005 г. No. 1, с. 44-56. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/RasVSS2c.pdf>.
7. Мельников В.П., Смутьский И.И. Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. – 98 с. Книга на двух языках. С обратной стороны: Melnikov V.P., Smulsky J.J. Astronomical theory of ice ages: New approximations. Solutions and challenges. – Novosibirsk: Academic Publishing House “GEO”, 2009. – 84 p. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/AsThAnR.pdf>.

Все вопросы и пожелания направлять  
Смутьскому И.И. по E-mail: JSmulsky@mail.ru.  
Web-page: <http://www.smull1.newmail.ru/>.

Последние изменения 11.11.2009 г. 9:20  
тюменского времени. Московское время = тюм. вр. - 2 часа.