

**Программа GALACTICA для решения задач  
гравитационного взаимодействия**

Смульский И. И.

Институт криосферы Земли СО РАН,  
625000, Тюмень, а/я 1230  
Tel. +7-3452-688-714

E-mail: [jmulsky@mail.ru](mailto:jmulsky@mail.ru), webpage: <http://www.smull.newmail.ru/>.

**Аннотация.** Для уточнения астрономической теории климата разработана программа Galactica. Она предназначена для численного решения задач гравитационного взаимодействия тел. С ее помощью была исследована эволюция Солнечной системы за 100 млн. лет, эволюция оси вращения Земли, воздействие Солнца на перигелий Меркурия, движение сближающихся с Землей астероидов, оптимальное движение космического аппарата и разрушение системы взаимодействующих тел. Для свободного использования разработана система Galactica. Она содержит все необходимое для решения задач даже начинающему исследователю.

**Ключевые слова.** Гравитационные взаимодействия, компьютерные вычисления, Солнечная система, свободный доступ.

**1. Введение**

В Институте Криосферы Земли СО РАН на протяжении ряда лет ведутся исследования по теме «Эволюция криосферы Земли в результате взаимодействия тел Солнечной системы». Решение проблемы эволюции криосферы мы рассматриваем в пять этапов, которые представлены на рис. 1 в виде последовательных задач. Кроме последовательного порядка их решения, как видно из рисунка, существуют и параллельные связи между этапами. Например, в задаче 4 для установления зависимостей между эволюцией природных процессов и изменением инсоляции Земли необходимо учитывать результаты всех этапов.

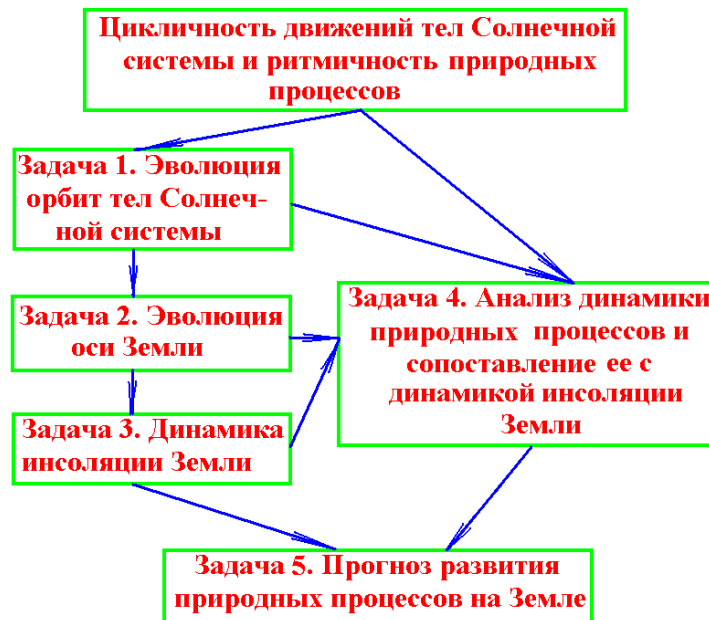


Рис. 1. Задачи и связи между ними при исследовании эволюции криосферы Земли в результате взаимодействия тел Солнечной системы.

В процессе решения орбитальной задачи впервые проинтегрированы уравнения орбитального движения за 100 млн. лет и получены новые представления об эволюции орбит. Во второй задаче на новой основе выведены уравнения вращательного движения и

исследовано воздействие планет, Солнца и Луны на эволюцию оси Земли.

При выполнении этих этапов был разработан ряд методов, который позволил решить несколько актуальных задач. При их решении мы убедились в достоинствах наших методов, в частности, программы Galactica. Поэтому ниже изложен ряд результатов, полученных с ее помощью, и предложена система свободного доступа Galactica.

## 2. Дифференциальные уравнения движения тел и метод их решения

Согласно закону всемирного тяготения сила притяжения тела с номером  $i$  телом с номером  $k$  выражается так:

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

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, например, центра масс в неускоренной системе координат.

Для решения системы дифференциальных уравнений (3) мы разработали следующий алгоритм. Значение функции в следующий момент времени  $t=t_0 + \Delta t$  определяется с помощью ряда Тейлора, который, например, для координаты  $x$  имеет вид:

$$x = x_0 + \sum_{k=1}^K \frac{1}{k!} x_0^{(k)} (\Delta t)^k, \quad (4)$$

где  $x_0^{(k)}$  – производная порядка  $k$  в момент  $t_0$ ,

$K$  – номер наивысшей производной.

Значение скорости  $x'$  определяется по аналогичной формуле, а ускорение  $x_0''$  – по формуле (3). Более высокие производные  $x_0^{(k)}$  определяются по выражениям, которые мы вывели в результате аналитического дифференцирования правых частей уравнений (3), записанных для координаты  $x$ . Прибавление каждого слагаемого с новой производной повышает точность на три порядка. Поэтому при двойной длине числа с 17-ю десятичными знаками можно ограничиться производными шестого порядка, т.е. при  $K = 6$ . В этом случае численное интегрирование происходит без увеличения погрешности со временем. По этому алгоритму была разработана программа Galactica [1]. В результате исследований было установлено, что точность расчета по ней превышает точности существующих программ расчета движений.

## 3. Эволюция орбит планет и Луны за 100 млн. лет

С помощью программы Galactica эволюция орбитального движения Солнечной системы последовательно исследовалась за несколько тысяч лет [2], несколько миллионов лет и за 100 млн. лет. Результаты расчетов за 7 тыс. лет, например, для Меркурия показаны точками на рис. 2. На графиках представлена динамика 6 элементов орбиты Меркурия:  $e$ ,  $i$ ,  $\varphi_{\Omega}$ ,  $\varphi_{p0}$ ,  $a$  и  $P$ . Угол  $i$  наклона плоскости орбиты определяется по отношению к плоскости неподвижного экватора, углом  $\varphi_{\Omega}$  измеряется дуга на небесном экваторе 1950.0 г. от оси  $x$  до

точки пересечения с ним круга плоскости орбиты. Ось  $x$  проходит через точку весеннего равноденствия 1950.0 года. Угол  $\varphi_{p0}$  перигелия определяется дугой орбиты от неподвижной на ней точки до точки перигелия. Эти три угла и эксцентриситет  $e$ , как видно из графиков, изменяются во времени  $T$ . А большая полуось  $a$  и период обращения  $P$  в среднем остаются неизменными, поэтому на графиках даны их отклонения от средних значений. Эти колебания по отношению к средним значениям  $a_m = 5.79 \cdot 10^{10}$  м и  $P_m = 2.408 \cdot 10^{-3}$  суг (1 суг равен одному столетию) имеют небольшую величину. Параметры  $e$ ,  $i$ ,  $\varphi_{\Omega}$  и  $\varphi_{p0}$  также колеблются с такими же относительными амплитудами, как и параметры  $a$  и  $P$ .

На рис. 2 линиями 2 и 3 приведена аппроксимации данных наблюдения. Как видим, эксцентриситет  $e$  и углы  $i$ ,  $\varphi_{\Omega}$  в точности совпадают с наблюдениями на интервале  $\pm 1000$  лет, т.е. в пределах справедливости аппроксимаций С. Ньюкомба и Дж. Симона и др. Расчеты для полуоси  $a$  и периода  $P$  также совпадают с наблюдениями, а полученные колебания по величине меньше разности между аппроксимациями разных авторов.

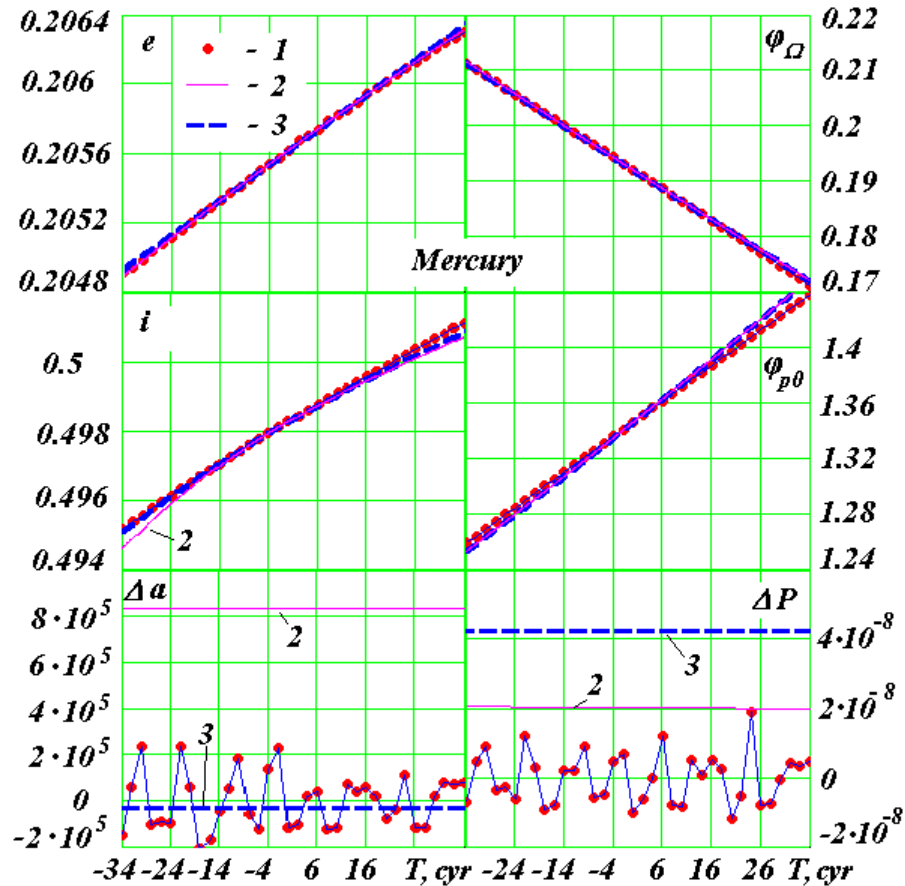


Рис. 2. Вековые изменения элементов орбиты Меркурия на интервале 7 тыс. лет:  $e$  – эксцентриситет;  $i$  – угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора 1950.0 г.;  $\varphi_{\Omega}$  – угол восходящего узла орбиты;  $\varphi_{p0}$  – угол перигелия;  $\Delta a$  – отклонение большой полуоси от среднего за 7 тыс. лет значения в метрах;  $\Delta P$  – отклонения продолжительности обращения от среднего за 7 тыс. лет в столетиях. Углы даны в радианах, а время  $T$  в столетиях отсчитывается в прошлое и будущее от эпохи 30.12.1949 г., 1 суг = 1 столетие. 1 – результаты численного решения программой Galactica; 2 – вековые изменения по Ньюкомбу С. [3]; 3 – вековые изменения по Симону Дж. Л. и др. [4].

Такие же исследования были выполнены по всем планетам. Все рассчитанные параметры всех тел согласуются с наблюдениями. Только один параметр и только для одной планеты немного отличается от наблюдений. Как видно из рис. 2, наклон изменения рассчитанного угла перигелия Меркурия  $\varphi_{p0}$  (точки) немного меньше, чем по данным

наблюдений (линии). Как мы установили, относительно неподвижного пространства рассчитанная скорость движения перигелия составляет  $530''$  в столетие, а по данным наблюдений –  $583''$  в столетие. О причине этого расхождения будет сказано далее.

В результате исследований за несколько миллионов лет получены периоды и амплитуды всех колебаний параметров орбиты Земли и других планет. Система уравнений (3) была проинтегрирована за 100 млн. лет и исследована эволюция орбит планет и Луны [5]. На рис. 3 показано изменение параметров орбиты Марса на интервале от -50 млн. лет до -100 млн. лет [6]. Эксцентриситет  $e$ , углы наклона  $i$ , восходящего узла орбиты  $\varphi_{\Omega}$  и др. ее параметры монотонно колеблются. Эти колебания имеют несколько периодов, и длительность наибольшего значительно меньше интервала в 50 млн. лет. На отрезке от 0 до -50 млн. лет графики имеют такой же вид (см. [6]), т.е. орбита Марса стабильна и устойчива и нет тенденции к ее изменению.

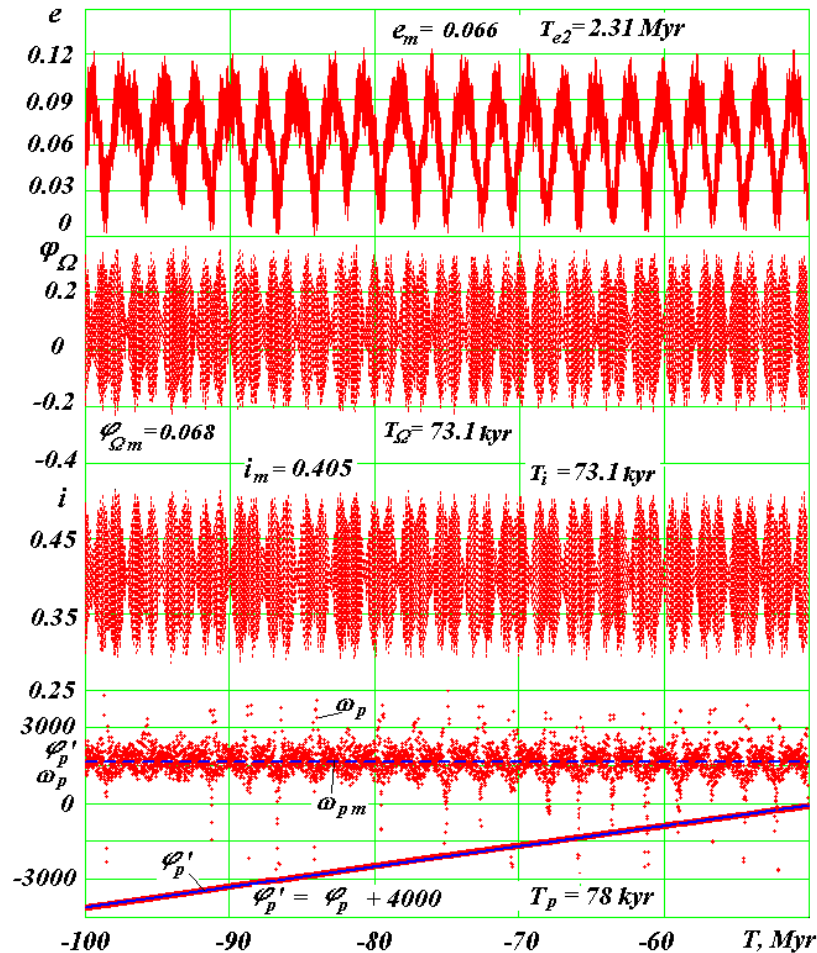


Рис. 3. Эволюция орбиты Марса за вторую половину промежутка в 100 млн. лет:  $T$  – время в миллионах лет в прошлое от эпохи 30.12.1949 г.; интервал между соседними точками равен 10 тыс. лет;  $e$  – эксцентриситет;  $i$  –наклон плоскости орбиты к плоскости экватора 1950.0 г. в радианах;  $\varphi_{\Omega}$  – угловое положение восходящего узла орбиты в радианах;  $\varphi_p$  – угловое положение перигелия в плоскости орбиты от восходящего узла в радианах;  $\omega_p$  – угловая скорость вращения перигелия в  $''/столетие$  на интервале времени в 20 тыс. лет; средняя за 50 млн. лет угловая скорость вращения перигелия  $\omega_{pm} = 1687''/столетие$ . С индексом  $m$  приведены средние значения параметров, а буквой  $T$  с индексами – основные периоды соответствующих параметров.

Аналогичные результаты мы получили и для других планет, т.е. этими исследованиями установлена устойчивость орбит и Солнечной системы в целом. Этот

результат – важный, т.к. в ряде работ, например, [7] - [8] при решении задачи существующими методами после 20 млн. лет орбиты начинали изменяться, что в дальнейшем приводило к разрушению Солнечной системы. На основании таких решений их авторы пришли к выводу о неустойчивости Солнечной системе и хаотичности движений в ней. На рис. 4 показаны рассчитанные Ж. Ляскарком и др. [8] изменения угла наклона орбиты Марса к плоскости подвижного его экватора в зависимости от начальных условий. Из нижнего левого графика видно, что за 50 млн. лет наклон орбиты изменяется с  $24^\circ$  до  $60^\circ$ . В то время как наши результаты на рис. 3 показывают, что угол  $i$  наклона орбиты Марса за весь период времени в 100 млн. лет устойчиво колеблется в диапазоне от  $16.5^\circ$  до  $30^\circ$ .

Причиной неустойчивости решений в работах вышеупомянутых авторов является несовершенство их методов интегрирования. Но так как более точные методы им были неизвестны, то они пришли к выводу о неустойчивости и хаотичности движения небесных тел. Эти идеи были подхвачены в других областях науки. Возникли направления по исследованию хаоса (даже хаотическая динамика), в которых проводится идея: все процессы на Земле и Вселенной обусловлены хаосом. Далее эти идеи перекочевали в социальные теории: никому не известна истина; нужно проявлять толерантность к любому мнению; принимать решения можно только в результате консенсуса; жизнь общества определяется хаотическим поведением индивидуумов и не подвластна плановому регулированию. Поэтому наилучшая ее организация может быть обеспечена рыночной экономикой.

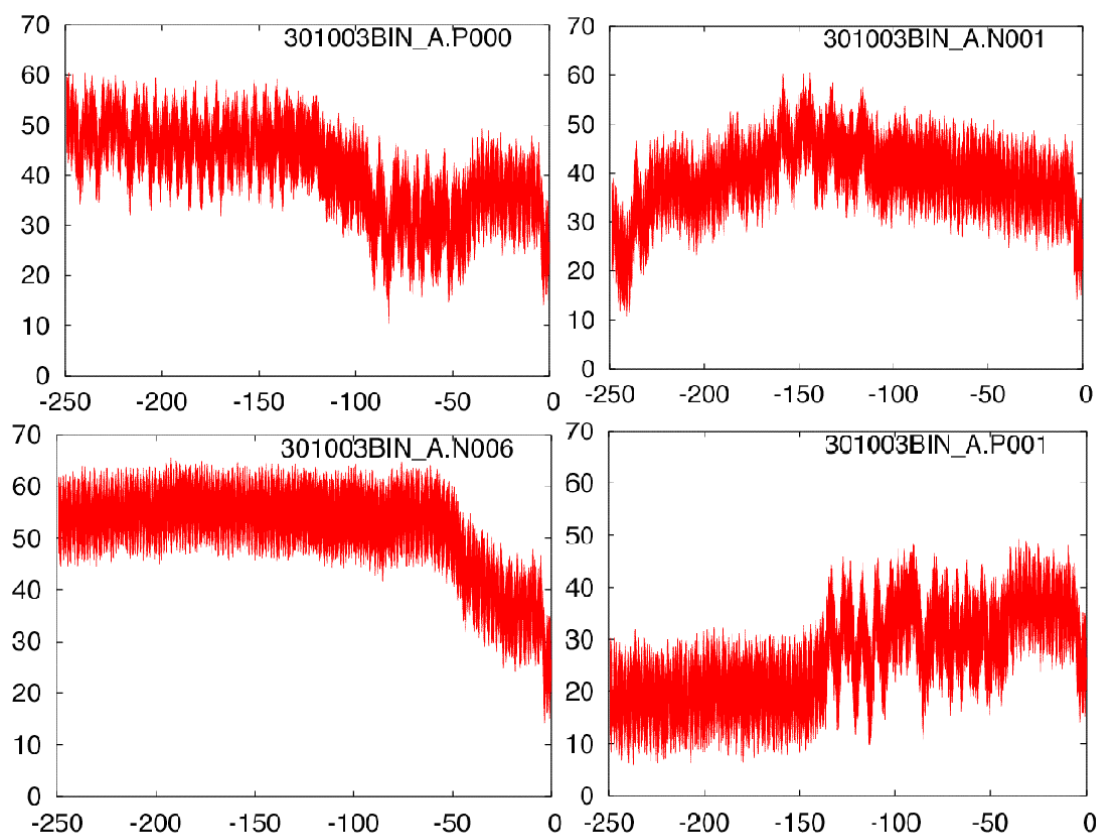


Рис. 4. Угол наклона между подвижными плоскостями орбиты Марса и его экватора при разных начальных условиях в решениях Ж Ляскара и др. [8]: угол дан в градусах, а время в млн. лет в прошлое.

Представление о хаотичности движения господствует в других задачах космической динамики. Например, используя существующие методы расчета, получают разные результаты для движения астероида Апофис. Основываясь на этом, считают, что после сближения с Землей в 2029 г. его движение становится хаотическим. Поэтому всю стратегию

исследований основывают на поиске статистических закономерностей и определению вероятности столкновения в 2036 г., а не на разработке детерминированных методов расчета движений.

#### 4. Составная модель вращения Земли

Задача о вращении Земли является самой сложной задачей механики. В настоящее время имеется ее приближенное решение. Для полного понимания причин изменения климата на Земле необходимо получить более точное решение уравнений вращательного движения Земли. Мы занимаемся их решением [9]. Однако существует ряд вопросов, которые необходимо выяснить независимо от уравнений вращательного движения. С этой целью мы разработали составную модель вращения Земли, в которой часть массы Земли распределена между периферийными телами (см. рис. 5), обращающимися вокруг центрального тела в плоскости экватора Земли [10]. Параметры составной модели вращающейся Земли определяются из следующих условий:

- 1) суммарная масса периферийных тел и центрального тела равна массе Земли;
- 2) периферийные тела обращаются по окружности вокруг центрального тела;
- 3) моменты инерции Земли и системы тел относительно осей  $x$  и  $y$  равны.

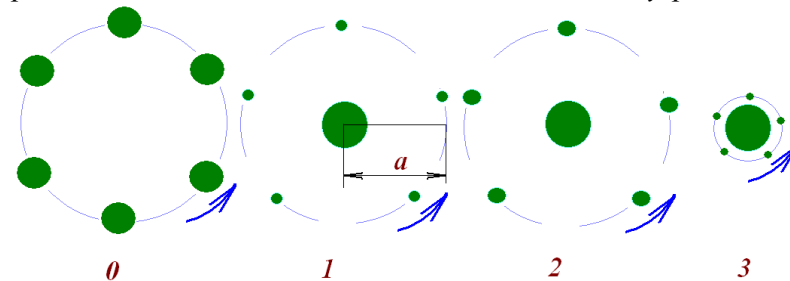
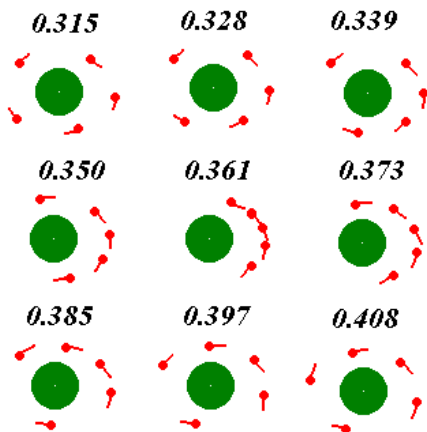


Рис. 5. Составные модели вращения Земли и их параметры при радиусе и массе Земли, соответственно:  $R_{Ee} = 6.37816 \times 10^6$  м и  $M_E = 5.9742 \times 10^{24}$  кг; в таблице:  $m_i$  – масса периферийного тела,  $a$  – радиус его орбиты в радиусах Земли и  $P$  – период обращения периферийного тела вокруг Земли:

$N_0$ модели	$m_i \times 10^{-19}$	$a$	$P$
	кг	$\times R_{Ee}$	час.
0	$9.96 \times 10^4$	4.45	23.93
1	3.57	6	23.93
2	7.21	6	23.93
3	0.54	1	1.408



Под воздействием Луны, Солнца и планет орбита каждого периферийного тела изменяется. В результате выполненных исследований мы установили, что эволюция оси орбиты имитирует эволюцию оси вращения Земли. С помощью программы Galactica были исследованы представленные на рис. 5 модели вращения Земли. Вариант модели без центрального тела (модель 0) оказался неустойчивым, поэтому в дальнейшем не исследовался.

Рис. 6. Динамика периферийных тел третьей модели в разные моменты времени (даны числами в годах) от начального момента.

Была исследована эволюция трех моделей на промежутке времени в 110 тыс. лет. Аналогично оси вращения Земли оси орбит моделей прецессируют и совершают нутационные колебания. Прецессия осей, т.е. их вращение, происходит вокруг движущейся

оси орбиты Земли. Периоды нутационных колебаний: 0.5 месяца, 0.5 года и 18.6 лет совпадают с периодами наблюдаемых колебаний оси вращения Земли. Эти и другие выводы являются независимыми критериями, которые необходимы для контроля результатов интегрирования уравнений вращательного движения Земли [9].

Составная модель вращения Земли может иметь еще одно применение. На рис. 6 представлены положения периферийных тел относительно центрального тела в разные моменты времени. Как видно, расстояние между периферийными телами периодически меняется: они либо сходятся, либо расходятся. Такие сближения и расхождения тел происходят во всех моделях на всем исследованном интервале в 110 тыс. лет.

На континенты Земли, как и на тела модели, воздействуют Луна, Солнце и планеты. По-видимому, по аналогии с телами модели они могут колебаться в широтном направлении. Вполне возможно, что подобие очертаний западной границы американского континента с береговой линией Африки и Европы обусловлено такими многократными сближениями. Проверка этой аналогии требует проведения специальных исследований.

### 5. Составная модель вращения Солнца

Уже 200 лет существует нерешенная проблема избыточного вращения перигелия Меркурия. Еще в 19 веке ученые установили, что в результате ньютоновского взаимодействия тел Солнечной системы перигелий орбиты Меркурия должен поворачиваться со скоростью  $530''$  в столетие. Однако, из анализа результатов наблюдения положений Меркурия за многие сотни лет следовало, что вращение перигелия его орбиты составляет  $573''$  в столетие, т.е. на  $43''$  больше. В 19 веке было выдвинуто ряд гипотез о возможных причинах избыточного вращения перигелия. Наибольшее признание получила гипотеза о конечной скорости тяготения. В 1898 г. Пауль Гербер опубликовал статью, в которой представил умоглядный механизм распространения тяготения, создал его теорию и вывел выражение для избытка вращения перигелия [11]. В 1915 г. эти результаты использовал А. Эйнштейн для построения общей теории относительности.

Наши предшественники не знали всех особенностей изменения параметров орбит планет, в том числе их перигелиев. Во-первых, перигелии планет вращаются не с постоянной скоростью. Как видно из рис. 3, скорость вращения  $\omega_p$  перигелия орбиты Марса изменяется от  $+4500''$  в столетие до  $-3000''$  в столетие при средней величине  $\omega_{pm} = 1687''/\text{столетие}$ . Как видим, наряду с прямым вращением перигелия в направлении орбитального движения существуют эпохи и его обратного движения. У перигелия Меркурия меньший разброс скоростей вращения перигелия: от  $765''$  до  $86.5''$  при средней за 50 млн. лет скорости  $\omega_{pm} = 520''$  в столетие. Кроме того, существуют короткопериодические колебания перигелия, например, для орбиты Меркурия имеется колебания с периодами 1.38 и 5.92 лет.

Во-вторых, при обработке данных наблюдений не учитывалось то, что точка отсчета долготы перигелия перемещается в пространстве. Знание особенностей изменения параметров орбит позволило нам выбрать неподвижную в пространстве точку для отсчета перигелия. Скорость перигелия Меркурия относительно нее по данным наблюдений равна  $583''/\text{столетие}$ , а в результате интегрирования уравнений (3) с помощью программы Galactica мы получили скорость перигелия  $530''/\text{столетие}$  для современной эпохи. Таким образом, избыток вращения перигелия составляет не  $43''$ , а  $53''$  в столетие.

В-третьих, мы исследовали все стороны проблемы вращения перигелия [1], [12]-[15], в том числе и конечную скорость распространения тяготения. Оказалось, что при световой скорости тяготения избыток вращения перигелия равен  $0.23''$  в столетие, что значительно меньше величины  $53''$  в столетие, полученной по наблюдениям.

В-четвертых, все гипотезы о причинах избыточного вращения перигелия, в том числе и гипотеза о конечной скорости тяготения, приводят к аналогичным изменениям других параметров орбиты: эксцентриситета  $e$ , периода  $P$ , угла наклона  $i$ . Однако, как мы уже отмечали, все рассчитанные параметры совпадают с наблюдениями.

В результате исследований мы установили, что если бы внутри орбиты Меркурия была еще одна планета, она могла бы сообщать необходимый избыток вращения перигелия Меркурия и не изменять остальные параметры его орбиты, а также параметры орбит других тел. Однако такой планеты нет, но Солнце вращается вокруг своей оси, и движущиеся массы его вещества могут оказывать такое же воздействие, как и планета. С целью проверки такого воздействия Солнца была создана составная его модель в нескольких вариантах. Рассмотрены модели с различными массами периферийных тел и с разными их количествами: пять и десять тел.

С помощью программы Galactica исследовалось взаимодействие тел Солнечной системы с Солнцем в виде составной модели. Была исследована эволюция орбит первых четырех планет за время 6 тысяч лет. Установлено, что чем дальше планета находится от Солнца, тем меньше зависят параметры ее орбиты от воздействия составной модели Солнца. При некоторой массе периферийных тел рассчитанное вращение перигелия Меркурия совпадает с тем, которое получено по наблюдениям, а остальные параметры орбиты не изменяются. Практически не зависят от этого варианта составной модели Солнца параметры орбиты Венеры, а тем более – параметры орбит Земли и Марса.

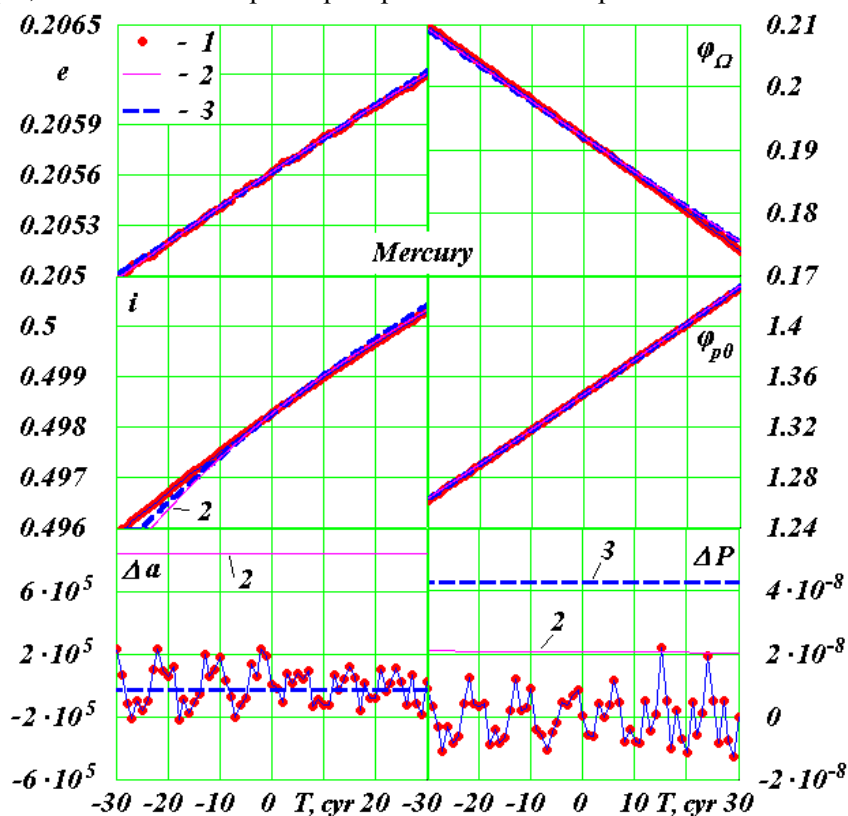


Рис. 7. Изменение параметров орбиты Меркурия при воздействии планет и составной модели Солнца No. 4. Углы даны в радианах, время  $T$  в столетиях,  $\Delta a$  в м и  $\Delta P$  в столетиях. 1 – результаты численного решения программой Galactica; 2 (тонкой белой или черной линиями) – вековые изменения по Ньюкомбу С. [3]; 3 – вековые изменения по Симону Дж. Л. и др. [4].

На рис. 7 представлены результаты этих исследований для модели № 4 с пятью периферийными телами. Как видно из графиков, динамика рассчитанного угла  $\varphi_{p0}$  перигелия Меркурия (точки) совпала с динамикой угла перигелия, определенной по вековым изменениям С. Ньюкомба и Дж. Симона и др. Графики изменения остальных параметров, как можно увидеть при сопоставлении с рис. 2, не изменились. Такие же исследования были выполнены для составной модели № 5 с десятью периферийными телами. Общая масса этих тел такая же, как и в модели № 4. Результаты полностью повторились.



Итак, с помощью программы Galactica было установлено, что все наблюдаемые движения в Солнечной системе объясняются и описываются ньютоновскими взаимодействиями ее тел.

### 6. Движение астероида Апофис

В ряде работ, например, [16-17] и др. показано, что астероид Апофис 13 апреля 2029 г. пройдет на расстоянии от центра Земли в диапазоне от 5.62 до 6.3 ее радиуса, и из-за хаотического изменения его траектории дальнейшее предсказание движения Апофиса становится невозможным. Эти авторы считают, что существует некоторая вероятность столкновения его с Землей в 2036 г. Мы проанализировали литературные источники и установили, что неопределенности в траектории Апофиса обусловлены несовершенством методов ее определения. С помощью программы Galactica мы проинтегрировали дифференциальные уравнения движения Апофиса, планет, Луны и Солнца за 1000 лет и исследовали эволюцию его орбиты [18] - [21].

На рис. 8 показано изменение расстояния между Апофисом и Землей для разных начальных условий при интегрировании уравнений (3). Вторым вариантом начальных условий был уточнен по новым наблюдениям Апофиса. Уточнение начальных условий, как видно из графиков, начинает оказывать влияние на движения астероида спустя 25 лет. Однако, принципиальные результаты не изменяются: сближение с Землей 13 апреля 2029 г. на 6 земных радиусов, прохождение в 2036 г. (см. точку *H* на рис. 8) на расстоянии не менее 50 млн. км и второе за столетие сближение с Землей на расстояние не менее 600 тыс. км. Эти результаты повторились также еще с 3-мя начальными условиями, которые отличались степенью уточнения.

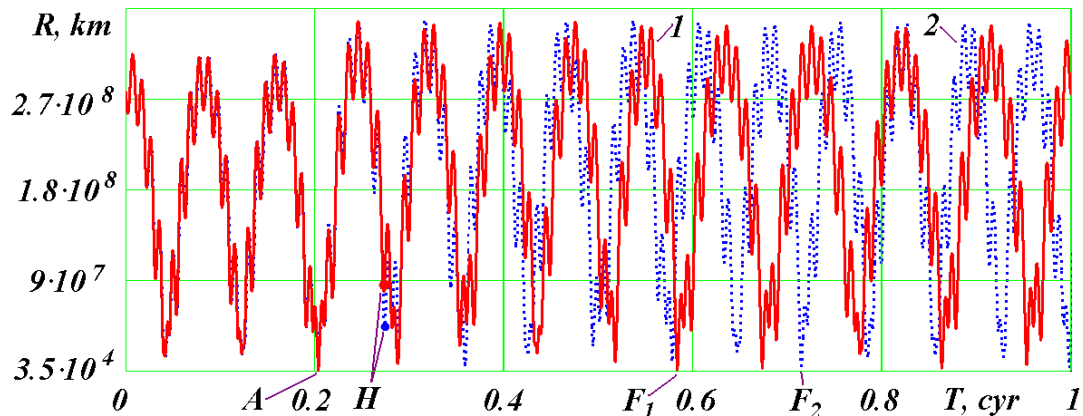


Рис. 8. Эволюция расстояния  $R$  между Апофисом и Землей за 100 лет при разных начальных условиях (НУ): 1 – НУ от 30.0 ноября 2008 г.; 2 – НУ от 04.0 января 2010 г. Календарные даты сближений в точках:  $A$  – 13 апреля 2029 г.;  $F_1$  – 13 апреля 2067 г.;  $F_2$  – 14 апреля 2080 г.;  $T$  - время в столетиях от 30.11.08. По 1-ым НУ:  $R_A = 38907$  км,  $R_H = 86$  млн. км,  $R_F = 622000$  км.

Итак, Апофис 13 апреля 2029 г. пройдет на расстоянии  $R_{min} = 38 \div 39$  тыс. км от центра Земли и в течение 1000 лет более близкого его прохождения не будет. Мы предлагаем использовать этот шанс и превратить Апофис в спутник.

Многие пионеры космонавтики освоение космического пространства вблизи Земли представляли с помощью больших обитаемых орбитальных станций. Однако, доставить с Земли такие большие массы представляет серьезную техническую и экологическую проблему. Поэтому благодаря счастливому случаю можно создать обитаемую станцию, превратив астероид Апофис в спутник Земли.

Возможны и другие применения такого спутника. Он может служить основой для космического лифта. Может использоваться в качестве “челнока” по доставке грузов на Луну. В этом случае спутник должен иметь вытянутую орбиту с радиусом перигея близким к радиусу геостационарной орбиты, а радиусом апогея, приближающимся к радиусу перигея

Лунной орбиты. Тогда грузы с геостационарной орбиты в перигее переключались бы на Апофис-спутник, а затем в апогее эти грузы могли доставляться на Луну. Последние два применения возможны, если движение спутника совпадает по направлению с вращением Земли и обращением Луны.

С помощью программы Galactica были выполнены исследования по превращению траектории астероида Апофис в орбиту спутника Земли. Было установлено, что задачу необходимо решать в два этапа. За 0.5 года до сближения Апофиса с Землей его скорость необходимо уменьшить на 2.5 м/с. Тогда он пройдет возле Земли с ночной ее стороны. Это в дальнейшем обеспечит то же направление обращения спутника, что и направление движения Луны. На втором этапе необходимо в точке сближения с Землей его скорость уменьшить на 3.5 км/с. В результате Апофис превратится в спутник с тем же направлением обращения вокруг Земли, что и Луна. Исследования с помощью программы Galactica показали, что орбита спутника является устойчивой. Поэтому он может выполнять свою задачу длительное время.

Превращение астероида в спутник является очень сложной задачей. Однако решение этой проблемы многократно увеличивает возможность предотвратить серьезную астероидную опасность. Поэтому, если общество возьмется за её решение, то это будет свидетельствовать о переходе от чисто теоретических изысканий к практическим работам в противоастероидной защите Земли.

### 7. Оптимизация пассивной орбиты с помощью гравиманевра

Многие катаклизмы погоды обусловлены влиянием Солнца. Чтобы их предусмотреть, необходимо наблюдать за Солнцем с близкого расстояния. Поэтому в ряде работ рассматривается проблема оптимального запуска космического аппарата к Солнцу. В отличие от известных в литературе вариантов мы «запускаем» аппарат в направлении обратном движению Земли (см. поз. 2 на рис. 9) со скоростью  $v = -11.5$  км/с. А относительно Солнца он движется в направлении обращения Земли.

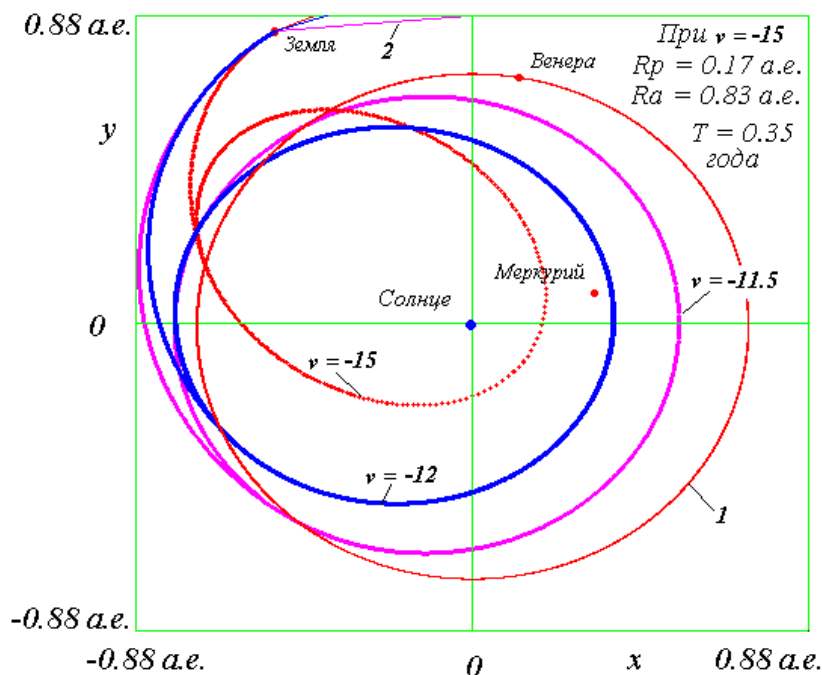


Рис. 9. Траектории и орбиты аппарата при старте 20.01.2001 г. с разными начальными скоростями  $v$ . Полет пассивный. После воздействия Венеры (на участке пересечения ее орбиты) аппарат выходит на эллиптическую орбиту. 1 – орбита Венеры.

Момент запуска и параметры движения аппарата рассчитываются так, чтобы при

пересечении орбиты Венеры (поз. 1) она была вблизи точки пересечения. Под воздействием Венеры происходит дополнительное торможение аппарата, и он выходит на устойчивую орбиту вокруг Солнца. Эти исследования были выполнены с помощью программы Galactica для нескольких начальных скоростей, траектории при которых показаны на рис. 9.

Использование тяготения Венеры позволяет в 1.7 раза ближе подойти к Солнцу при одной и той же начальной скорости аппарата, а при одинаковом приближении снизить начальную скорость с - 18.2 км/с до -15 км/с [22].

При работе над этой проблемой был решен ряд аналитических задач, которые позволяют определять необходимые условия запуска аппарата с Земли и прохождения его возле Венеры. Решения этих задач и программа Galactica в совокупности представляют собой вычислительный комплекс, который позволяет рассмотреть новую технологию космических полетов. Суть ее заключается в том, что аппарат выводится из атмосферы Земли с определенными параметрами движения. А дальнейший его полет происходит в пассивном полете без корректирующих двигателей. Это значительно удешевляет космическую миссию. Такие полеты в больших количествах могут потребоваться при противоастероидной защите Земли, создании межпланетных станций и выполнении других космических задач.

### 8. Многослойные кольцевые структуры

Исследование эволюции многослойных кольцевых структур важно для понимания проблем существования и устойчивости колец планет, шаровых звездных скоплений и галактик. Создание кольцевых структур основано на следующих двух положениях [23] - [24].

1. На тело, расположенное снаружи кольцевой структуры, сила воздействия равна силе, которую создавало бы тело, расположенное в центре структуры и имеющее массу равную массе всей структуры.
2. На тело, расположенное внутри кольцевой структуры, суммарная сила воздействия от всех ее тел равна нулю.

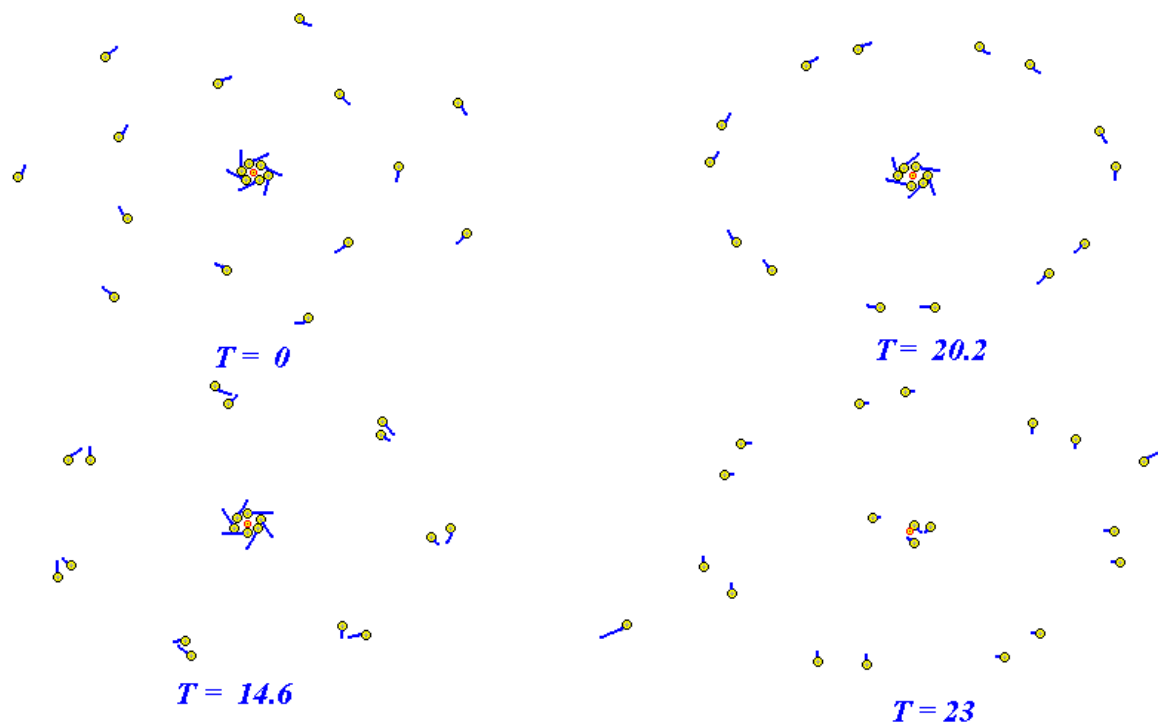


Рис. 10. Динамика 10-й модели кольцевой структуры: масса центрального тела равна половине массы Солнца. Центральное тело  $m_0$  зачернено; размеры тел не соответствуют величинам масс; линии у тел соответствуют направлению и величине их скоростей. Время  $T$  дано в годах.

Эти положения в точности выполняются для сплошных колец, а при использовании их для дискретного количества тел, дальнейшее движение тел обусловлено их реальным взаимодействием. Положения и скорости тел на кольцах таких структур задавались на основании нашего точного решения задачи  $n$ -тел, осесимметрично расположенных на плоскости [25]. Следует отметить, что в составных моделях Земли и Солнца также использовались решения этой задачи.

Было рассмотрено 10 моделей кольцевых структур, каждая из которых состояла из трех колец. На каждом кольце располагается от 5 до 8 тел, а в центре находится центральное тело. Масса всех тел равняется массе Солнечной системы. В результате исследования эволюции этих моделей с помощью программы Galactica были выявлены устойчивые и неустойчивые структуры. В устойчивых моделях масса центрального тела равнялась массе Солнца, а в неустойчивых – половине этой массы. На рис. 10 показаны 4 момента в динамике одной из неустойчивых моделей. Изменения начинаются в результате взаимодействия между телами двух наружных колец, которые в дальнейшем приводят к образованию общего кольца и через 23 года движения – к разрушению внутреннего кольца. При этом два тела выбрасываются из системы в противоположных направлениях.

Разлет тел происходит с большими скоростями. Такие выбросы вещества происходят в скоплениях звезд, в галактиках и при появлении сверхновых звезд. Их объясняют взрывами таких объектов. Как видим, эти явления обусловлены ньютоновским взаимодействием.

### **9. Система свободного доступа Galactica**

Мы рассмотрели примеры решения разнообразных задач с помощью программы Galactica: эволюция Солнечной системы; эволюция оси вращения Земли (и в то же время задача моделирования перемещения континентов); моделирование воздействия вращающегося Солнца (при этом открыт новый механизм ньютоновского воздействия); оптимальное движение космического аппарата; эволюция движения астероида, а также различные искусственные манипуляции с ним, например, превращение его в спутник; эволюция совокупности тел. Этот перечень задач и полученных результатов многократно увеличится, если будет создан свободный доступ для работы с программой Galactica.

Мы работаем над созданием системы свободного доступа Galactica для решения задач гравитационного взаимодействия тел на суперкомпьютере. Такая система свободного доступа Horizons для решения задач динамики Солнечной системы создана NASA (<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>). Она весьма эффективно используется как для осуществления космических миссий в рамках NASA, так и для решения задач сторонних исследователей.

Система Horizons является аппроксимационной. В ней положения планет и Луны получают на основании аппроксимации сотен тысяч данных наблюдений. Формально в системе, кроме силы тяготения Ньютона, в рамках стандартной динамической модели (SDM) учитывается ещё ряд малых дополнительных воздействующих факторов. Однако их влияние фактически аннулируется тем, что результаты вычислений в итоге аппроксимируются данными наблюдений. Положение существующих небесных тел, движение которых аппроксимировано, вычисляется достаточно точно. Если же необходимо рассчитать движение любого тела, то в системе Horizons интегрируется движение только заданного тела, а движение других тел берется из аппроксимационной системы. Если же тело не входит в базу аппроксимационной системы, или рассматривается вне базы наблюдения, то точность расчета движения ухудшается при отдалении по времени от базы наблюдений.

Разработанная нами программа Galactica решает задачу движения тел, как взаимодействующих по закону тяготения Ньютона материальных точек. В ней используется высокоточный метод интегрирования уравнений. Для расчета задаются начальные условия, и база наблюдений не используется. Поэтому с помощью программы Galactica можно рассчитывать движения тел, которые ранее не наблюдались, причем в любых конфигурациях

и в любых количествах.

Galactica отличается от системы Horizons другими принципами и методами расчета. Это особенно может быть полезно, когда возникнет необходимость проверить правильность принимаемых важных для человечества решений. Кроме того, Galactica может решать такие задачи, для решения которых система Horizons не предназначена. С ее помощью могут решаться разнообразные задачи для космических исследований, а также моделироваться задачи, которые возникают при исследовании эволюции Земли, планет и Солнечной системы.

Для правильной постановки и решения задачи гравитационного взаимодействия тел требуется много знаний в области механики и математики. Так как этими глубокими знаниями исследователь в конкретной области не обладает, то он, как правило, стремится использовать имеющийся математический инструмент, который применяется для решения подобных задач. Это позволяет ему по аналогии с известными задачами использовать приемы по подготовке задачи к решению, выполнения решения и контроля его погрешностей, а также последующей обработке результатов. При создании программы Galactica и при ее применении для решения разнообразных задач эти этапы были реализованы. Очень часто они требовали решения дополнительных задач механики или в численном, или в аналитическом виде. Часть из этих приемов можно отнести к общим, а часть – только к определенным задачам. Поэтому целесообразно решенные задачи: их постановка, исходные и начальные данные и полученные результаты также сделать доступными.

Система свободного доступа Galactica для работы на персональном компьютере находится по адресу: <http://www.ikz.ru/~smulski/GalactW/>. Ее описание имеется в файлах GalDiscr.pdf и GalDiscrE.pdf на русском и английском языках, соответственно. Описание позволяет даже начинающему исследователю ставить и решать задачи с помощью программы Galactica. После создания системы свободного доступа на суперкомпьютере информация о ней будет размещена на вышеупомянутом сайте. Для постановки задач и решения задач с небольшим временем счета можно использовать систему Galactica на персональном компьютере, а систему свободного доступа на суперкомпьютере необходимо использовать для объемных задач.

В настоящее время в системе Galactica имеются примеры задач, выполненные только нами. В последующем, набор выполненных задач будет пополняться другими исследователями. Это позволит каждому новому исследователю, основываясь на надежных инструментах и методах, быстро ставить и успешно решать новые задачи. Пользователями системы могут быть не только опытные специалисты, но и способные школьники и студенты.

## 10. Заключение

В статье представлены основные сведения о программе Galactica и о ее возможностях. В систему Galactica, кроме программы Galactica, входит ряд составных частей, которые описаны в Руководстве пользователя <http://www.ikz.ru/~smulski/GalactW/GalDiscrE.pdf>. В Руководстве также приведены подробные инструкции по всем этапам решения задачи.

## 11. Благодарности

Работа выполнялась при поддержке грантов губернатора Тюменской области 2003 и 2004 г.г. и грантов интеграционной программы Президиума РАН № 13 в 2008 - 2011 г.г.

Вычисления выполнялись на суперкомпьютерах Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН в ИВМиМГ СО РАН.

В работе на разных этапах принимали участие участвовали: Л.И. Смутьский, Я.И. Смутьский, П.А. Апасев, О.И. Кротов, М.Э. Чикмарева, М.А. Пономарев, И.В. Бинеев, Е.Н. Невидимова, Н.Ю. Анохин, В.С. Ботвина, Е.А. Коврижкина, А.А. Павлова, И.А. Шаболина, М.Л. Панова и Е.Ф. Сафина.

## 12. Литература

1. Смутьский И. И. Теория взаимодействия. - Новосибирск: Из-во Новосибирского ун-та, НИЦ ОИГТМ СО РАН. - 1999. - 294с. [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.
3. Newcomb S. The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy. Washington: Government printing office. 1895. –202 p.
4. Simon J.L., Bretagnon P., Chapront J. et. al. Numerical Expression for Precession Formulae and Mean Elements for the Moon and the Planets // Astron. and Astrophys. – 1994, vol. 282, p. 663-683.
5. 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>.
6. 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>.
7. Laskar J. Large-scale chaos in the solar system // Astron. Astrophys. – 1994. – Vol. 287, L9 – L12.
8. Laskar J., Correia A. C. M., Gastineau M., Joutel F., Levrard B. and Robutel P. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars // Icarus.– 2004.– Vol. 170, Iss. 2.– P. 343-364.
9. Smulsky J.J. The Influence of the Planets, Sun and Moon on the Evolution of the Earth’s Axis // International Journal of Astronomy and Astrophysics, 2011, Vol. 1, Issue 3, pp. 117-134. doi:10.4236/ijaa.2011.13017. (<http://www.SciRP.org/journal/ijaa>).
10. Мельников В. П., Смутьский И.И., Смутьский Я.И. Составная модель вращения Земли и возможный механизм взаимодействия континентов // Геология и Геофизика, 2008, №11, с. 1129-1138. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/RGGRu190.pdf>.
11. Gerber P. Die raumliche und zeitliche Aubreitung der Gravitation// Z. Math. Phis.- 1898.- Vol. 43.- P. 93-104. <http://bourabai.narod.ru/articles/gerber/gerber.htm>. (Translated into Russian by Johann Kern. <http://bourabai.narod.ru/articles/gerber/gerber-rus.htm>).
12. Смутьский И.И. Численное моделирование эволюции спутника вращающегося тела / В сб. Теоретические и прикладные задачи нелинейного анализа. Российская Академия Наук: ВЦ им. А.А. Дородницына. М.: ВЦ РАН А.А. Дородницына. – 2008. С. 100-117. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/ModSun07c.pdf>.
13. Смутьский И.И. Составная модель вращения Солнца и смещение перигелия Меркурия / Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы VI Всероссийской научной конференции, посвященной 130-летию Томского государственного университета и 40-летию НИИ Прикладной Математики и Механики Томского государственного университета. Томск, 30 сентября – 2 октября 2008 г. – 2008 г. – С. 433-434. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/ModSun51c.pdf>.
14. Smulsky J. J. Gravitation, Field and Rotation of Mercury Perihelion// Proceedings of the Natural Philosophy Alliance. 15th Annual Conference 7-11 April 2008 at the University of New Mexiko, Albuquerque, USA. Vol. 5, No. 2. Published by Space Time Analyses, Ltd. Arlington, MA, USA.– 2009. – Pp. 254-260. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/08Smulsky2c.pdf> <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/ModSun04.pdf> (перевод).

15. Smulsky J.J. New Components of the Mercury's Perihelion Precession // Natural Science. Vol. 3, No.4, 268-274 (2011). doi:10.4236/ns.2011.34034. <http://www.scirp.org/journal/ns>.
16. Giorgini J.D., Benner L.A.M., Ostro S.I., Nolan H.C., Busch M.W. Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis // Icarus. 2008 v.193, pp. 1-19.
17. Рыхлова Л.В., Шустов Б.М., Польш В.Г., Суханов К.Г. Насущные проблемы астероидной опасности // Околосемная астрономия 2007// Материалы международной конференции 3-7 сентября 2007 г. п. Терскол. Международный центр астрономических и медико-экологических исследований Национальной академии наук Украины и Институт астрономии РАН. г. Нальчик, 2008 г., с. 25-33.
18. Смутьский И.И., Смутьский Я.И. Эволюция орбиты Апофиса и новые космические задачи // Наука и технология. – Краткие сообщения XXIX Российской школы, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. – УрО РАН, 2009. С. 181-183. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvlApoph2r.pdf>.
19. Smulsky J.J., Smulsky Ya.J. Evolution of Apophis Orbit for 1000 Years and New Space Targets // "Protecting the Earth Against Collisions with Asteroids and Comet Nuclei" - Proceedings of the International Conference "Asteroid-Comet Hazard-2009", Eds.: A. Finkelstein, W. Huebner, V. Shor. - Saint-Petersburg: "Nauka". - 2010. -Pp. 390-395. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvlAp3Ec.pdf>.
20. Смутьский И.И., Смутьский Я.И. Эволюция движения астероидов Апофис и 1950 DA за 1000 лет и возможное их использование / Институт криосферы Земли СО РАН. - Тюмень, 2011. - 36 с. - ил. : 10. Библиогр.: 27 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 25.01.11 г. № 21-В2011. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvAp1950c.pdf>.
21. Смутьский И.И., Смутьский Я.И. Превращение астероидов в спутники – реальное направление в противоастероидной защите Земли // Труды Конгресса-2010 "Фундаментальные проблемы естествознания и техники". Часть II (М - У). Серия "Проблемы исследования Вселенной". Выпуск 34-2. Санкт-Петербург, 2010. – С. 263 - 272. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/PrAsSp04c.pdf>.
22. Смутьский И.И. Оптимизация пассивной орбиты с помощью гравиманевра // Космические Исследования, 2008, том 46, № 5, с. 484–492. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/KOS0484.pdf>.
23. Смутьский И.И. Конструирование кольцевых структур / Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы VI Всероссийской научной конференции, посвященной 130-летию Томского государственного университета и 40-летию НИИ Прикладной Математики и Механики Томского государственного университета. Томск, 30 сентября – 2 октября 2008 г. – 2008 г. – С. 431-432. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/CnsKoStr2.pdf>.
24. Смутьский И. И. Многослойные кольцевые структуры// Письма в ЭЧАЯ. 2011. Т. 8, No. 5(168). С. 737-743.
25. Смутьский И.И. Осесимметричная задача гравитационного взаимодействия N-тел// Математическое моделирование. - 2003, т. 15, № 5, с. 27-36. <http://www.smul1.newmail.ru/Russian1/IntSunSyst/Osvnb4.doc>.