

УДК 521.13

**Численные исследования возможной эволюции
орбит Плутона и тел занептунового пояса**

С. П. Ипатов

Путем численного интегрирования уравнений движения задачи четырех тел исследуются изменения со временем элементов орбит трех гравитационно взаимодействующих тел, движущихся вокруг Солнца в одной плоскости. Массы тел близки к массе Плутона, а их исходные орбиты — круговые. В рассмотренном варианте за время около $2.5 \cdot 10^5$ оборотов тел вокруг Солнца эксцентриситет орбиты одного из тел увеличился до 0.05, а его перигелийное расстояние уменьшилось на 10%. Дальнейшую эволюцию орбит можно исследовать методом сфер действия. С помощью этого метода получено, что перигелийное расстояние одного из тел может уменьшиться вдвое за время примерно 10^7 оборотов тел вокруг Солнца. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что некоторые тела занептунового пояса (одним из них, по мнению Т. М. Энеева, был Плутон) могли мигрировать к орбите Нептуна.

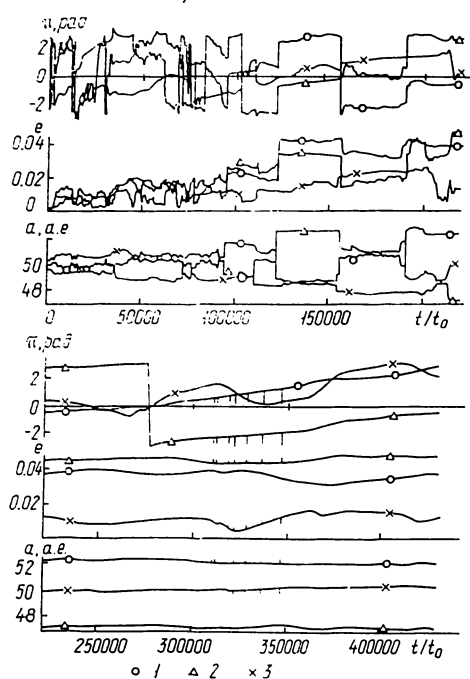
COMPUTER SIMULATION OF POSSIBLE ORBIT EVOLUTION OF PLUTO AND BODIES OF THE TRANS-NEPTUNE BELT, by Ipatov S. I.— Evolution of orbits of three gravitationally interacting bodies moving about the Sun in one plane is investigated by solving numerically the motion equations of the four-body problem. The body masses were taken equal to Pluto's mass and the body orbits were circular. In the variant under consideration the orbital eccentricity of one of the bodies reached 0.05 and its perihelion distance decreased by 10% for the time of $2.5 \cdot 10^5$ revolutions around the Sun. Further evolution can be investigated by the method of action spheres. Using this method we obtained that the perihelion distance of one of the bodies decreased by a factor of 2 for 10^7 revolutions. The results showed that some bodies from the trans-Neptune belt (according to T. M. Eneev, Pluto was one of them) could migrate to the Neptune's orbit.

Некоторые исследователи считают, что за орбитой Нептуна существует пояс, состоящий в основном из тел астероидных размеров [7]. По мнению Т. М. Энеева [7, 8], этот пояс находится на расстоянии 40—60 а. е. от Солнца, а его масса примерно 20—40 M_{\oplus} (M_{\oplus} — масса Земли). Т. М. Энеев предположил, что Плутон первоначально находился в этом поясе, но из-за гравитационных взаимодействий с телами, массы которых близки к массе Плутона, изменил свою орбиту так, что стали возможными его тесные сближения с Нептуном. При этих сближениях орбита Плутона сильно изменилась, в частности наклонение стало большим. По предположению Т. М. Энеева, в этом поясе первоначально могло быть несколько тел, массы которых были близки к массе Плутона, но часть из них разрушилась при катастрофических столкновениях друг с другом и с более мелкими телами. Первоначально орбиты тел этого пояса находились почти в одной плоскости. Однако в ходе эволюции тела начали двигаться по орбитам с разными наклонениями и стали реже сближаться друг с другом. Кроме Плутона к Нептуну, а затем и дальше внутрь Солнечной системы мигрировали (мигрируют и сейчас) и другие, более мелкие, тела занептунового пояса. Такие тела могли быть одним из источников метеоритов, выпадавших на Землю и другие планеты [7, 8].

В настоящей работе для исследования возможной эволюции орбиты Плутона, предложенной Т. М. Энеевым, путем моделирования на ЭВМ рассматривается эволюция орбит нескольких (двух — четырех) одинаковых гравитационно взаимодействующих частиц — материаль-

ных точек, движущихся вокруг Солнца. Массы частиц $M \approx M_{\text{Р}}$ ($M_{\text{Р}}$ — масса Плутона). Исходные орбиты находятся в занептуновом поясе, имеют нулевые эксцентриситеты и наклонения.

Существуют и другие гипотезы образования Плутона. Например, Плутон мог сформироваться в зоне планет-гигантов в ходе их аккумуляции, а на эволюцию орбит тел занептунового пояса могли оказывать влияние тела, залетавшие в этот пояс из зон питания планет-гигантов



[11]. Однако и в этом случае представляет интерес исследование миграции тел занептунового пояса внутрь Солнечной системы. Изучение эволюции орбит гравитационно взаимодействующих частиц помогает также лучше понять процесс аккумуляции планет из диска планетезималей и эволюцию орбит тел поясов, которые могли существовать между орбитами планет-гигантов на некоторых этапах формирования последних [11].

Изменение со временем t больших полуосей a , эксцентриситетов e и долготы перигелия π орбит трех гравитационно взаимодействующих частиц, движущихся вокруг Солнца: t_0 — время, за которое первая частица совершает один оборот вокруг Солнца; 1, 2, 3 — номера частиц

Известно [6], что большая полуось современной орбиты Плутона $a \approx 39.44$ а.е., ее эксцентриситет $e \approx 0.247$, афелийное расстояние $r_a \approx 49.2$ а.е., а перигелий лежит внутри орбиты Нептуна. Если при эволюции орбиты Плутона r_a почти не изменялось, то для исходной почти круговой орбиты $a \approx 50$ а.е. В случае, когда для исходной орбиты $a \approx 40$ а.е. и $e=0$, а в ходе эволюции $r_a = \text{const}$, тело достигает в перигелии орбиты Нептуна при $a \approx 35$ а.е. и $e \approx 1/7$.

Результаты численного исследования эволюции орбит двух одинаковых частиц (материальных точек, движущихся вокруг Солнца в одной плоскости) показывают [1—3], что при $M \approx M_{\text{Р}}$ и исходных эксцентриситетах $e^0_1 = e^0_2 = e_0 \leq 0.02$ частицы не могли приобрести большие (≥ 0.1) эксцентриситеты орбит. В частности, при интегрировании на ЭВМ уравнений движения на интервале времени $T = 2.5 \cdot 10^4 t_0$ (t_0 — время, за которое частица, названная первой, совершает один оборот вокруг Солнца) получено, что в случае первоначально круговых орбит максимальное значение эксцентриситетов орбит частиц в ходе эволюции $e^T_{\text{max}} \leq 0.02$. В других вариантах расчетов взаимное гравитационное влияние частиц учитывалось методом сфер действия, т. е. внутри сферы действия не учитывалось гравитационное влияние Солнца, а вне сферы — взаимодействие частиц. Показано [3], что если $e_0 \geq 0.005$, то $e^T_{\text{max}} \leq 2 e_0$.

На рисунке представлены графики изменений со временем t элементов орбит трех одинаковых гравитационно взаимодействующих частиц — материальных точек, движущихся вокруг Солнца в одной плоскости. Они получены путем интегрирования на ЭВМ БЭСМ-6 уравнений движения задачи четырех тел. Интегрирование системы диф-

ференциальных уравнений движения, записанных в гелиоцентрической системе прямоугольных координат, проводилось на интервале времени $T=4.3 \cdot 10^5 t_0$ с помощью программы BULSTO, реализующей метод Булирша—Штера [9] экстраполяции с переменным шагом. Массы частиц $M \approx M_{\oplus}$ ($M=7.5 \cdot 10^{-9} M_{\odot}$). Исходные значения больших полуосей a_i ; первоначально круговых орбит первой, второй и третьей частиц составляют 50, 50.3 и 49.7 а. е., а значения угла φ_i между фиксированной осью x и исходными направлениями на частицы равны 2, 4 и 6 рад соответственно.

Величина переменного шага интегрирования выбиралась внутри программы BULSTO так, чтобы относительная ошибка на каждом шаге не превышала первоначально заданной постоянной ε_r . В представленном на рисунке варианте $\varepsilon_r=10^{-8}$. Отметим, что при отсутствии тесных сближений частиц следует брать $\varepsilon_r \sim 10^{-9}—10^{-8}$, так как в ходе эволюции интегралы энергии и момента количества движения меньше всего изменяются при $\varepsilon_r \sim 10^{-7}—10^{-8}$, а решения, полученные при $\varepsilon_r=10^{-8}$ и $\varepsilon_r=10^{-9}$, ближе друг к другу, чем при $\varepsilon_r=10^{-8}$ и $\varepsilon_r=10^{-7}$. Для приведенных выше исходных данных и $T=10^5 t_0$ ($t_0 \approx 350$ лет при $a=50$ а. е.) графики изменений со временем элементов орбит частиц получены также при $\varepsilon_r=3 \cdot 10^{-7}$ и $\varepsilon_r=10^{-9}$. Для различных ε_r эти графики близки друг к другу только до первого тесного сближения, и при тесных сближениях частиц можно говорить только о статистическом характере эволюции. Однако при рассмотренных значениях ε_r тенденции и пределы изменений элементов орбит примерно одинаковы. В частности, для $T=10^5 t_0$ максимальное значение эксцентриситетов орбит частиц в ходе эволюции $e_{\max}^T=0.033$ при $\varepsilon_r=3 \cdot 10^{-7}$ и $e_{\max}^T=0.025$ при $\varepsilon_r=10^{-8}$ и $\varepsilon_r=10^{-9}$. Для $T=2.5 \cdot 10^5 t_0$ и $\varepsilon_r=10^{-8}$ получено $e_{\max}^T=0.05$. В последнем случае для частицы с $e \approx 0.05$ перигелийное расстояние $r_{\pi} \approx 45$ а. е.

В рассмотренных вариантах через время $\Delta t \leq T/500$ вычислялись значения J и K интегралов энергии и момента количества движения. Получено, что изменения J и K происходят в основном при тесных сближениях частиц. В представленном на рисунке варианте при $T=4.3 \cdot 10^5 t_0$ имеем $\Delta J_{R_K}^T = |J_K - J_0| / |J_0| = 1.2 \cdot 10^{-6}$ и $\Delta K_{R_K}^T = |K_K - K_0| / |K_0| \approx 3 \cdot 10^{-7}$, где J_0, K_0, J_K и K_K — исходные и конечные значения J и K . Для рассмотренных выше исходных данных и $T=10^5 t_0$ значения $\Delta J_{R_K}^T$ и $\Delta K_{R_K}^T$ минимальны при $\varepsilon_r=10^{-9}$. Однако в случае тесных сближений частиц для других исходных орбит минимум этих величин достигался и при других значениях ε_r .

Результаты проведенных исследований эволюции орбит двух, а также трех частиц, движущихся вокруг Солнца, показывают, что если в ходе эволюции происходят тесные сближения частиц, то при $10^{-11} \leq \varepsilon_r \leq 10^{-7}$ варьирование ε_r оказывает на эволюцию орбит примерно такое же влияние, как и варьирование исходных положений частиц на орбитах (кроме случаев, когда исходные расстояния между некоторыми частицами малы).

Отметим, что в представленном на рисунке варианте при $t \geq 2.2 \times 10^5 t_0$ в течение длительного времени ($\Delta t \approx 2 \cdot 10^5 t_0$) получена относительная (по сравнению с предыдущим этапом эволюции) стабилизация орбит. При этом средний эксцентриситет орбит $e_{cp} \geq 0.025$, большие полуоси и эксцентриситеты орбит первой и второй частиц мало изменялись, а долгота π перигелия их орбит монотонно возрастала. Угол между направлениями на перигелии орбит этих частиц $\Delta \pi \approx 3$ рад. Разность значений долготы перигелия орбит третьей и первой частиц изменялась почти периодически с амплитудой $\delta \approx 1$ рад. Для значений больших полуосей орбит частиц выполнялись следующие неравенства: $a_2 < a_3 < a_1$. Перигелий орбиты третьей частицы был близок к афелию орбиты второй частицы. На этапе «стабилизации» элементы оскулирующих орбит частиц несколько раз на короткое время ($\Delta t < 200 t_0$) из-

менялись (при этом изменения e достигали 0.002, а изменения π — одного радиана), а потом принимали прежние значения.

В [3] при исследовании эволюции гелиоцентрических орбит трех и четырех одинаковых частиц, массы которых $M \approx M_{\oplus}$, взаимное гравитационное влияние частиц учитывалось методом сфер действия. В случае трех частиц, для которых исходные эксцентриситеты орбит $e_0 = 0.005$, а исходные значения больших полуосей орбит $a_0 \approx 50$ а. е., в одном из вариантов расчетов получено, что для интервалов $10^6 t_0$, $3 \cdot 10^6 t_0$ и $10^7 t_0$ величина e^T_{\max} составляет примерно 0.1, 0.2 и 0.4, а минимальное перигелийное расстояние r^{\min}_π равно примерно 45, 30 и 15 а. е. соответственно. Для тех же значений T и других рассмотренных исходных данных получены меньшие значения e^T_{\max} . Если за время между сближениями частиц до расстояния, равного радиусу соответствующей сферы действия, направления на перигелии орбит подвергались случайным возмущениям (источником таких возмущений могли быть, например, вековые возмущения планет), или если рассматривалась эволюция орбит не трех, а четырех частиц, то найденные значения e^T_{\max} были больше, чем в рассмотренном выше случае.

Сравнение результатов исследования эволюции гелиоцентрических орбит трех частиц, полученных с помощью метода сфер действия, с результатами, представленными на рисунке, показывает, что при $e_0 \leq 0.005$ и $e^T_{\max} = \max\{e_1, e_2, e_3\} \leq 0.05$ скорость увеличения e^T_{\max} и $e_{\text{ср}}$ меньше, если взаимное гравитационное влияние частиц учитывать методом сфер действия, а не численным интегрированием уравнений движения. Если эксцентриситеты орбит небольшие, то их меньшая скорость роста при учете взаимного гравитационного влияния частиц методом сфер действия получена также в ряде других случаев. Например, аналогичный вывод можно сделать из сравнения графиков изменения $e_{\text{ср}}$ со временем, представленных в [4, 12]. В этих работах для близких исходных данных рассматривалась эволюция дисков тел, двигавшихся вокруг Солнца в одной плоскости по первоначально почти круговым орбитам и объединявшихся при столкновениях. Исходные диски соответствовали зоне питания планет земной группы. Взаимное гравитационное влияние тел учитывалось как методом сфер действия [4], так и путем численного интегрирования уравнений движения (на расстояниях $\Delta r \leq 300 r_{\text{сд}}$, где $r_{\text{сд}}$ — радиус сферы действия) [12].

В [10] показано, что при учете взаимного гравитационного влияния частиц методом сфер действия относительное движение частиц внутри этой сферы близко к реальному движению, если $\epsilon > 4$ (ϵ — эксцентриситет орбиты, по которой одна частица движется внутри сферы действия относительно другой частицы). Чем больше ϵ , тем моделируемое движение ближе к реальному. При исследовании эволюции гелиоцентрических орбит трех или четырех одинаковых частиц с помощью метода сфер действия нами получено, что в случае $M \sim M_{\oplus}$ за то время, когда $e_{\text{ср}}$ возрастает от 0.01 до 0.05, доля сближений, при которых $\epsilon < 4$, составляет $N_{\epsilon < 4} \approx 10\%$. Чем больше $e_{\text{ср}}$, тем больше ϵ и меньше $N_{\epsilon < 4}$, а значит, тем лучше метод сфер действия отражает реальную эволюцию. Если $e_{\text{ср}} \geq 0.05$, то в рассмотренных вариантах $N_{\epsilon < 4} \leq 1\%$, а для более чем 80% сближений $\epsilon > 100$. Поэтому при $e_{\text{ср}} \geq 0.05$ и $M \sim M_{\oplus}$ относительное движение частиц внутри сферы действия в большинстве случаев близко к реальному.

В [3] представлены графики изменений со временем элементов гелиоцентрических орбит двух гравитационно взаимодействующих частиц, движущихся в одной плоскости. Для одних и тех же исходных данных часть этих графиков получена с помощью метода сфер действия, а часть — численным интегрированием уравнений движения задачи трех тел. Сравнение этих графиков показывает, что чем больше эксцентриситеты гелиоцентрических орбит, тем ближе результаты, определенные этими методами. Если в ходе эволюции минимальное рас-

стояние между частицами меньше радиуса соответствующей сферы действия, то в случае первоначально круговых орбит с помощью метода сфер действия получены меньшие значения $e_{\text{ср}}$. При $e_0 \geq 2 \mu^{1/3}$ (μ — отношение массы большей частицы к массе Солнца) пределы и тенденции изменений элементов гелиоцентрических орбит, полученные с помощью метода сфер действия, близки к реальным, хотя при $e_{\text{ср}} \approx 2 \mu^{1/3}$ имеем $N_{e < 4} > 90\%$. Эти результаты свидетельствуют о том, что при исследовании пределов изменений эксцентриситетов и больших полуосей гелиоцентрических орбит частиц, массы которых $M \sim M_{\text{П}}$, при $e_0 \geq 0.005$ можно использовать метод сфер действия. Так как в этом методе не учитываются взаимодействия тел на расстояниях, больших радиуса сферы действия, то при учете взаимного гравитационного влияния частиц методом сфер действия e'_{max} и $e_{\text{ср}}$ могут увеличиваться медленнее, чем в действительности.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при исследовании эволюции гелиоцентрических орбит трех гравитационно взаимодействующих частиц методом сфер действия скорость увеличения $e_{\text{ср}}$ и e'_{max} не больше, чем при численном интегрировании уравнений движения, причем чем больше $e_{\text{ср}}$, тем ближе данные, определенные разными методами. Поэтому, учитывая результаты, полученные методом сфер действия, можно сделать вывод о том, что для $a_0 \approx 50$ а. е., $e_0 = 0$ и ряда исходных положений частиц на орбитах при учете взаимного гравитационного влияния частиц численным интегрированием уравнений движения за время существования Солнечной системы одна из частиц сможет в перигелии достигнуть орбиты Нептуна, а $e'_{\text{max}} \approx 0.2-0.4$.

Численные расчеты на ЭВМ проводились для плоской модели. Учет наклонов орбит может уменьшить скорость увеличения эксцентриситетов. Однако при большем числе тел и (или) при больших значениях их масс e'_{max} может увеличиваться быстрее, чем в рассмотренных выше вариантах. Кроме того, эксцентриситеты орбит тел занептунового пояса могли увеличиваться также вследствие гравитационного влияния тел, проникавших в этот пояс из зон питания планет-гигантов в ходе формирования этих планет.

В плоском случае при $e_0 = 0$ и $e'_{\text{max}} = 0.2$ возможны столкновения тел (в основном при малых эксцентриситетах). Если $a \geq 30$ а. е. и наклона орбит $i \geq \mu^{2/5}$ (μ — отношение массы большего из двух сближающихся тел к массе Солнца), то вероятность столкновения двух определенных тел мала. Однако в диске, состоящем из большого числа тел, за время существования Солнечной системы рассматриваемое тело может столкнуться с одним из них.

Результаты проведенных исследований показывают, что предложенная Т. М. Энеевым модель эволюции орбиты Плутона возможна. Здесь исследовалась эволюция орбит одинаковых гравитационно взаимодействующих частиц. При исследовании эволюции орбит двух частиц, движущихся вокруг Солнца, получено [1, 2], что максимальный эксцентриситет орбиты частицы массой M , гравитационно взаимодействующей с частицей массой $M_0 \gg M$, в основном больше максимального значения эксцентриситетов орбит двух одинаковых гравитационно взаимодействующих частиц M_0 , если исходные орбиты частиц в обоих случаях одинаковы. Поэтому полученные нами результаты указывают на возможность миграции к Нептуну тел занептунового пояса, меньших Плутона. Численные исследования миграции тел под влиянием планет от орбиты Нептуна внутрь Солнечной системы проводились в работах [5, 11].

Автор выражает признательность Т. М. Энееву за постановку задачи и внимание к работе.

1. *Ипатов С. И.* Взаимное гравитационное влияние двух протопланет в плоской задаче трех тел при первоначально круговых орбитах.— М., 1979.— 32 с.— (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 183).
2. *Ипатов С. И.* Задача трех тел и взаимодействие протопланет в протопланетном облаке.— М., 1979.— 28 с.— (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 192).
3. *Ипатов С. И.* О приближенном методе исследования взаимного гравитационного влияния тел протопланетного облака. К вопросу об эволюции орбиты Плутона.— М., 1980.— 33 с.— (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 43).
4. *Ипатов С. И.* Численные исследования аккумуляции планет земной группы.— М., 1982.— 28 с.— (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 144).
5. *Ипатов С. И.* Численные исследования эволюции пространственных колец гравитирующих тел, соответствующих зонам питания планет-гигантов.— М., 1984.— 28 с.— (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 1).
6. *Физика космоса / Под ред. Р. А. Сюняева.*— М.: Сов. энциклопедия, 1986.— 783 с.
7. *Энеев Т. М.* Новая аккумуляционная модель формирования планет и структура внешних областей Солнечной системы.— М., 1979.— 23 с.— (Препр. / АН СССР, Ин-т прикл. математики; № 166).
8. *Энеев Т. М.* О возможной структуре внешних (защитных) областей Солнечной системы // Письма в Астрон. журн.— 1980.— 6, № 5.— С. 295—300.
9. *Bulirsch R., Stoer J.* Numerical treatment of ordinary differential equations by extrapolation methods // Numer. Math.— 1966.— 8, N 1.— P. 1—13.
10. *Cox L. P., Lewis J. S., Lecar M.* A model for close encounters in the planetary problem // Icarus.— 1978.— 34, N 2.— P. 415—427.
11. *Ipatov S. I.* Accumulation and migration of the bodies from the zones of giant planets // Earth, Moon, and Planets.— 1987.— 39, N 2.— P. 101—128.
12. *Lecar M., Aarseth S. J.* A numerical simulation of the formation of the terrestrial planets // Astron. J.— 1986.— 305, N 1.— P. 564—579.

Ин-т прикл. математики
им. М. В. Келдыша АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию 20.07.87,
после доработки 15.06.88

Новые книги

Волощук Ю. И., Кашеев Б. Л., Кручиненко В. Г. МЕТЕОРНОЕ ВЕЩЕСТВО И МЕТЕОРЫ

Киев: Наук. думка, 1989 (I кв.).— 20 л.— 4 р. 10 к.

В монографии изучаются явления, сопровождающие вторжение твердых частиц из космического пространства в атмосферу Земли. Рассмотрена физическая теория метеоров, в частности вопросы нагревания и разрушения мелких и крупных метеорных тел в атмосфере Земли. Приведены результаты исследования отражения радиоволн от ионизированных следов. Обнаружена пространственная структура метеорного комплекса вблизи орбиты Земли. Обсуждается вопрос происхождения пылевой составляющей космического пространства, вклада различных источников в метеорный комплекс. Построена инженерная модель распределения метеорных тел вблизи орбиты Земли.

Для специалистов, изучающих верхние слои атмосферы, околоземное космическое пространство, эволюцию малых тел Солнечной системы.